

TESI

per a l'obtenció del GRAU DE DOCTOR

presentada a

L'ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS
INDUSTRIALS DE BARCELONA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

per

Jordi MARTÍNEZ MIRALLES

**CONTRIBUCIÓ A L'ESTUDI DE L'ACÚSTICA DE LA
TENORA I DEL TIBLE EN EL DOMINI TEMPORAL**

Director de la Tesi

Joaquim AGULLÓ I BATLLE

juny de 1987

Als meus pares

PREFACI

L'acústica dels instruments musicals ha estat un pol d'atracció en medis universitaris d'àmbit científic, pel seu caràcter de disciplina pont entre la ciència i una branca de l'art, la de la producció dels sons musicals.

La complexitat dels problemes que planteja el funcionament d'aquests instruments, juntament amb la càrrega cultural que tenen associada, han atret nombrosos departaments arreu del món a posar a prova la capacitat de les seves formulacions analítiques, algorismes numèrics i mètodes experimentals, i han servit d'estímul per a perfeccionar-los.

El goig d'explicar en termes físics, i de manera cada vegada més precisa i completa, el funcionament dels instruments musicals és el premi desitjat per l'investigador que hi esmerça el seu temps i esforç.

En el cas d'un grup de recerca pertanyent a una Escola d'Enginyeria, com és el cas del d'aquesta Universitat, aquest objectiu científic d'explicar el funcionament dels instruments es veu prolongat de manera lògica vers l'afany d'intervenció activa propi de l'enginyer: com modificar els instruments per millorar-ne determinades prestacions o corregir-ne certs defectes.

Incorporar al disseny dels instruments musicals la metodologia pròpia de l'enginyeria seria el darrer pas en aquest afany, per altra banda estimulat per una autèntica necessitat de redisseny dels instruments tradicionals de Catalunya per tal de satisfer les exigències creixents d'intèrprets i compositors.

Amb aquestes motivacions s'havia emprès al Laboratori de Mecànica i Vibracions de l'ETSEIB un programa de recerca per a l'estudi i perfeccionament dels instruments de canya de la cobla -tible i tenora-, en el qual s'insereix aquesta tesi.

Una tesi anterior [i] havia desbrossat el terreny i cobert l'estudi en l'àmbit freqüencial, centrat en l'anàlisi espectral dels sons mantinguts i en la determinació experimental i per càlcul, de la impedància acústica. La mesura precisa de l'afinació -i de les seves fluctuacions- dels sons mantinguts no

havia estat possible a causa de les dificultats derivades de la complexitat de la seva forma d'ona.

La present tesi havia de cobrir l'àmbit temporal, d'estudi més difícil que el freqüencial i que demana tècniques experimentals i de càlcul més potents, però que és el més idoni per fonamentar la modelització matemàtica d'aquests instruments i entendre'n el funcionament, atès el seu caràcter de sistema no lineal. L'estudi temporal estaria centrat en la captació dels transitoris d'atac i en la determinació, experimental i per càlcul, de la resposta impulsional. Encara que aquesta última pot ser trobada com a transformada de Fourier inversa de la resposta freqüencial, i així ha estat fet en una tesi que s'ha desenvolupat en paral·lel [ii], es va preveure de desenvolupar un mètode estrictament contingut en el domini temporal, basat en les funcions de reflexió, que formaria a més una descripció detallada de la propagació d'ones a l'interior de l'instrument. També es va preveure de desenvolupar un aparell basat en un microprocessador per mesurar en temps real l'afinació dels sons mantinguts.

En portar a terme aquest programa es va fer palès el fet sorprenent que l'acústica dels tubs cònics presentava notables llacunes relatives a les funcions de reflexió, fet atribuïble a certes dificultats matemàtiques derivades de la presència d'exponencials creixents en algunes funcions de reflexió, les quals no compleixen per tant la condició general d'existència de la transformada de Fourier. Des d'un enfoc conceptual l'origen del problema rau en l'artifici matemàtic implicat en la solució de les dues ones propagatives en sentits oposats, que descriu un fenomen físicament realitzable per mitjà de dos fenòmens un dels quals, en el cas dels tubs cònics, no és físicament realitzable: La propagació d'ones esfèriques vers el vèrtex del con sense que es provoquin reflexions.

Resoldre aquestes dificultats portà a desenvolupar una col·lecció completa de funcions de reflexió per a les discontinuïtats que es presenten als instruments objecte d'estudi i posar a punt algorismes numèrics de multiconvolució que fossin estables malgrat la intervenció d'exponencials creixents. Al passat Congrés Internacional d'Acústica (12th ICA, Toronto, juliol de 1.986) es va constatar que aquesta labor havia estat feta en paral·lel per l'equip del Dr. D. Ayers de la California State University. Uns mateixos objectius i les mateixes limitacions bibliogràfiques els havien menat també a

desenvolupar les funcions de reflexió que els mancaven així com tècniques de multiconvolució, per bé que amb certes diferències de formulació respecte a les presentades en aquesta tesi.

[i] Cardona S. (1980). Contribució a l'estudi de l'acústica de la tenora.
Tesi Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.

[ii] Barjau A. (1987). Contribució a l'estudi de l'acústica dels instruments de canya de la cobla. *Tesi Doctoral.* Universitat Politècnica de Catalunya.

AGRAÏMENTS.

L'autor d'aquest treball agraeix la col.laboració prestada per tota les persones l'ajut de les quals, des de diferents àmbits, ha estat decisiu per dur el treball a bon terme. En especial:

Al director del treball, Dr. Joaquim Agulló. El seu profund coneixement del camp de l'acústica musical i el seu assessorament constant han estat fonamentals per a la realització de la tesi.

Al Dr. Salvador Cardona, la tesi doctoral del qual -sobre l'acústica de la tenora- ha estat el punt de partida per a aquest treball, per l'aportació de suggeriments i idees cabdals per al desenvolupament de les tècniques experimentals i de càlcul presentades.

A la Dra. Anna Barjau, qui ha desenvolupat alguns dels programes de càlcul emprats. La seva tesi sobre la simulació del funcionament global del tible i la tenora, realitzada en paral·lel amb aquesta tesi, ha proporcionat informació valuosa per analitzar els resultats experimentals obtinguts.

A tot l'equip del Laboratori de Mecànica i Vibracions de l'E.T.S.E.I.B. per la seva participació en diferents aspectes relacionats amb el treball.

A l'instrumentista Jaume Vilà, professor de tenora del Conservatori Superior de Música de Barcelona i primer tenor de la Cobla Ciutat de Barcelona, qui a més de facilitar el seu instrument per als assaigs experimentals, ha col·laborat en aquells assaigs que requerien la participació d'un instrumentista, i ha aportat el seu coneixement musical a l'hora d'interpretar els resultats.

A l'instrumentista Francesc Elias, professor de tible del Conservatori Superior de música de Barcelona i tible de la Cobla Ciutat de Barcelona, qui també ha col·laborat en diversos assaigs relacionats amb aquest instrument.

Als instrumentistes Josep Macià, tible de la Cobla Jovenívola de Sabadell, Francesc Benítez, tible de la Cobla Ciutat de Barcelona, i Francesc Alpiste,

tenor en diverses formacions musicals, els quals també han facilitat els seus instruments i han participat en diversos assaigs.

Als dolçainers Antoni Ortí i Julià Pastor els quals han participat en les mesures d'afinació realitzades amb dolçaines del País Valencià aportant una nombrosa col·lecció d'instruments. Els resultats obtinguts amb aquestes mesures han estat inclosos en un extens estudi sobre les característiques musicals d'aquests instruments realitzat per A. Ortí.

Als professors A.H. Benade i W.R. Savage, organitzadors de la sessió "Musical instruments -Very Old and Very New-" dins del 12^{au} Congrés Internacional d'Acústica (Toronto 1.986), per l'interès mostrat pel programa d'investigació sobre els instruments de fusta de la cobla en convidar al Dr. Agulló a presentar l'estat de la recerca a l'esmentada sessió.

Al Dr. D. Ayers, professor de la California State University, per l'interès mostrat pel treball fet sobre el càlcul de la resposta impulsional a partir de les funcions de reflexió, arran d'haver-se fet palès el treball en paral·lel d'ambdós equips sobre aquest tema. Els seus comentaris i il·lustracions han estat clarificadors i un estímul en el meu treball.

A la C.I.R.I.T.- Comissió Interdepartamental de Recerca i Innovació Tecnològica de la Generalitat de Catalunya, pel seu ajut econòmic per al desenvolupament de la tècnica experimental de mesura de l'afinació en temps real.

A la Fundació Roviralta per la donació de l'analitzador d'espectres, instrument que ha estat emprat en gran part dels assaigs experimentals realitzats.

ÍNDEX

NOTACIÓ

INTRODUCCIÓ

1. DESCRIPCIÓ DELS INSTRUMENTS.

1.1. DESCRIPCIÓ MUSICAL.

1.2. MIDES GEOMÈTRIQUES I MATERIALS CONSTRUCTIUS.

1.3. PRINCIPI DE FUNCIONAMENT.

2. CAPTACIÓ I ANÀLISI DELS TRANSITORIS D'ATAC.

2.1. PLANTEJAMENT I OBJECTIUS.

2.2. EL MUNTATGE EXPERIMENTAL.

2.3. ELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

. Els atacs de la tenora.

. Els atacs del tible.

2.4. CONCLUSIONS DELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

3. MESURA I ANÀLISI DE L'AFINACIÓ EN TEMPS REAL.

3.1. PLANTEJAMENT I OBJECTIUS.

3.2. EL MUNTATGE EXPERIMENTAL.

3.3. DESCRIPCIÓ DEL DETECTOR DE FONAMENTALS.

3.4. ALGORISMES PER A LA DETERMINACIÓ DEL PERÍODE.

- . Algorisme de comparació ràpida.
- . Algorisme d'autocorrelació.

3.5. AVALUACIÓ DE LES CARACTERÍSTIQUES DEL DETECTOR DE FONAMENTALS.

3.6. ELS RESULTATS EXPERIMENTALS. PRESENTACIÓ I ANÀLISI.

- . L'afinació de la tenora.
- . L'afinació del tible.
- . L'afinació de la dolçaina del País Valencià.

3.7. CONCLUSIONS DELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

4. DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA RESPOSTA IMPULSIONAL.

4.1. PLANTEJAMENT I OBJECTIUS.

4.2. EL MUNTATJE EXPERIMENTAL.

4.3. CALIBRACIÓ DE LA RESPOSTA IMPULSIONAL.

4.4. ELS RESULTATS EXPERIMENTALS. PRESENTACIO I ANÀLISI.

- . Les respostes impulsional de la tenora.
- . Les respostes impulsional del tible.

4.5. CONCLUSIONS DELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

5. DETERMINACIO TEÒRICA DE LA RESPOSTA IMPULSIONAL. METODE DE LA MULTICONVOLUCIÓ.

5.1. PLANTEJAMENT I OBJECTIUS.

5.2. DETERMINACIÓ DE LES FUNCIONS DE REFLEXIÓ GENERALS.

- . Cas dels tubs cilíndrics.
- . Cas dels tubs cònics.

5.3. REFLEXIÓ DEGUDA A UN CANVI DE DIÀMETRE.

5.4. REFLEXIÓ DEGUDA A UN CANVI DE CONICITAT.

5.5. REFLEXIÓ EN UN EXTREM TANCAT.

5.6. REFLEXIÓ EN UN EXTREM OBERT.

- . Extrem obert en un tub cilíndric.
- . Extrem obert en un tub cònic.

5.7. REFLEXIÓ DEGUDA A UN FORAT OBERT.

5.8. REFLEXIÓ DEGUDA A UN FORAT TAPAT.

5.9. FUNCIÓ D'ESMORTEÏMENT.

- . Cas de tubs cilíndrics.
- . Cas de tubs cònics.

5.10. SÍNTESI DE LA RESPOSTA IMPULSIONAL. MÈTODE DE LA MULTICONVOLUCIÓ.

5.11. RESULTATS IL·LUSTRATIUS.

6. ESTUDI DE L'ESPONTANEÏTAT.

6.1. INTRODUCCIÓ.

6.2. DESCRIPCIÓ DELS MECANISMES D' AUTOEXCITACIÓ.

6.3. OBSERVACIÓ DELS ATACS.

6.4. RELACIÓ ENTRE LA RESPOSTA IMPULSIONAL I L'ESPONTANEÏTAT.

CONCLUSIONS.

BIBLIOGRAFIA.

APÈNDIX-I. ESQUEMES ELÈCTRICS DEL DETECTOR DE FONAMENTALS.

APÈNDIX-II. CÀLCUL NUMÈRIC DE LES INTEGRALS DE CONVOLUCIÓ.

A-II.1. CONVOLUCIÓ AMB UNA FUNCIÓ EXPONENCIAL.

A-II.2. CONVOLUCIÓ AMB LA FUNCIÓ DE REFLEXIÓ D'EXTREM OBERT.

A-II.3. CONVOLUCIÓ AMB LA FUNCIÓ D'ESMORTEÏMENT.

NOTACIÓ.

NOTACIÓ.

- a . Constant de la funció de reflexió a l'extrem obert d'un tub cilíndric.
- b . Constant de la funció de reflexió a l'extrem obert d'un tub cònic.
- b_1, b_2 . Constants de les funcions de reflexió degudes a un forat.
- c . Celeritat de propagació del so en camp lliure.
- d . Diàmetre interior de l'instrument a una secció genèrica.
 . Diàmetre interior de l'instrument a l'extrem obert.
- d_f . Diàmetre d'un forat.
- d_t . Diàmetre interior de l'instrument a la secció on es situa un forat.
- d_1, d_2 . Diàmetres a les seccions extremes d'un tram cònic.
- f . Freqüència en Hz.
- $f(t)$. Funció temporal genèrica.
- $g(t)$. Funció temporal genèrica.
- $h(x, t)$. Funció de resposta impulsional.
- $h_+(x, t)$. Resposta impulsional de l'ona que es propaga vers l'extrem d'entrada -ona p_+ -.
- $h_-(x, t)$. Resposta impulsional de l'ona que es propaga vers l'extrem de sortida -ona p_- -.
- h_f . Alçada d'un forat.

- j . Unitat imaginària.
- k . Número d'ona.
- m, n . Pendents de les aproximacions lineals emprades en el càlcul recurrent de les integrals de convolució.
- $p(x,t)$. Camp de la pressió.
- $\hat{p}(x,\omega)$. Variable complexa representativa del camp de la pressió.
- p_+ . Pressió de l'ona que es propaga vers l'extrem d'entrada.
- p_- . Pressió de l'ona que es propaga vers l'extrem de sortida.
- p_{a+}, p_{a-} . Pressions de les dues ones en el tram "a" a la secció on es situa una discontinuïtat.
- p_{b+}, p_{b-} . Pressions de les dues ones en el tram "b" a la secció on es situa una discontinuïtat.
- p_i . Pressió de l'ona incident.
- p_r . Pressió de l'ona reflectida.
- $p_{a-}^{\sigma}, p_{b+}^{\sigma}$. Pressions de les dues ones esmorteïdes que arriben a una discontinuïtat provinents dels trams "a" i "b" que la delimiten.
- p_{a+}^r, p_{b-}^r . Pressions de les dues ones reflectides en una discontinuïtat per a cadascun dels trams "a" i "b" que la delimiten.
- p_{a-}^t, p_{b+}^t . Pressions de les dues ones transmeses en una discontinuïtat per a cadascun dels trams "a" i "b" que la delimiten.
- $\hat{p}_f(\omega)$. Pressió a la secció d'unió d'un forat amb el tub de l'instrument.
- p_0 . Pressió estàtica.

r	. Distància des del vèrtex fins a una secció en un tub cònic. . Radi de les ones esfèriques.
r_a, r_b	. Distància del vèrtex fins a una discontinuïtat per als trams "a" i "b" respectivament.
r_e	. Distància del vèrtex fins a l'extrem de sortida -extrem obert- o bé fins a l'extrem d'entrada -extrem tancat-.
r_f	. Distància del vèrtex fins a la secció on es situa un forat.
r_1, r_2	. Distàncies des del vèrtex fins a les seccions extremes d'un tram cònic.
s_1, s_2	. Pols de les funcions de reflexió freqüencials degudes a un forat.
t	. Temps.
u	. Variable.
$v(x,t)$	. Camp de la velocitat.
$\hat{v}(x,\omega)$	. Variable complexa representativa del camp de la velocitat.
v_+	. Velocitat de l'ona que es propaga vers l'extrem d'entrada.
v_-	. Velocitat de l'ona que es propaga vers l'extrem de sortida.
$\hat{v}_f(\omega)$	. Velocitat de l'aire que passa a través de la unió d'un forat, amb el tub de l'instrument.
x	. Coordenada longitudinal de la columna d'aire de l'instrument.
x_1, x_2	. Coordenades longitudinals de les seccions extremes d'un tram cilíndric.

y	. Variable.
A_+, A_-	. Amplitud de les ones que es propaguen vers l'extrem d'entrada i vers l'extrem de sortida respectivament.
B	. Relació d'àrees en una discontinuïtat ($B = S_a/S_b$). . Relació de diàmetres entre les seccions extremes d'un tub.
$B(t)$	. Funció Hanning.
C_p	. Calor específica a pressió constant.
FFT	. Transformada Ràpida de Fourier.
FFT ⁻¹	. Transformada Inversa Ràpida de Fourier.
I_p	. Impuls de pressió.
I_v	. Impuls de velocitat.
J_1	. Funció de Bessel d'ordre 1.
K	. Constant de proporcionalitat entre la magnitud de la reflexió a l'extrem obert i el diàmetre de l'extrem obert.
K_i $i=1....7$	. Constants emprades en les formulacions recurrents per al càlcul numèric de les integrals de convolució.
K_a, K_b	. Constants emprades en les formulacions recurrents per al càlcul numèric de les integrals de convolució.
K	. Rigidesa equivalent de forat tancat.
L	. Longitud d'un tram -cilíndric o cònic-.
M	. Massa equivalent de forat tancat.

- Q . Factor de l'equació d'ona amb esmorteïment intern.
- $R(x,t)$. Funció temporal de reflexió. Formulació general.
- $\hat{R}(x,\omega)$. Funció freqüencial de reflexió. Formulació general.
- R_c . Funció de reflexió deguda a un canvi de conicitat.
- R_d . Funció de reflexió deguda a un canvi de diàmetre.
- R_{eo} . Funció de reflexió en un extrem obert.
- R_{et} . Funció de reflexió en un extrem tancat.
- R_{fo} . Funció de reflexió deguda a un forat obert.
- R_{ft} . Funció de reflexió deguda a un forat tancat.
- R_+, R_- . Funcions que defineixen l'ona reflectida a cada cantó d'una discontinuïtat.
- R'_+, R'_- . Funcions que defineixen l'ona transmesa a cada cantó d'una discontinuïtat.
- R_x . Funció d'autocorrelació.
- R_0 . Coeficient de la funció de reflexió en un extrem obert que desenhoca en absència de pla.
- R . Part real d'una variable o una funció complexa.
- S . Area d'una secció transversal de l'instrument.
- S_a, S_b . Arees de les seccions dels trams "a" i "b" que delimiten una discontinuïtat.
- S_f . Area de la secció d'un forat.

S_t	. Area de la secció del l'instrument on es situa un forat.
T	. Període. . Amplada d'una finestra. . Durada finita d'un senyal enregistrat.
TF	. Transformada de Fourier.
TF^{-1}	. Transformada Inversa de Fourier.
V_f	. Volum d'un forat.
W	. Cabal d'energia radiada. . Constant de la funció de reflexió deguda a un forat tancat.
$Z(x,\omega)$	. Impedància acústica.
$Z_{an}(x,\omega)$	. Impedància acústica analògica.
$Z_+(x,\omega)$	. Impedància acústica de l'ona que es propaga vers l'extrem d'entrada -ona p_+ -.
$Z_-(x,\omega)$	. Impedància acústica de l'ona que es propaga vers l'extrem de sortida -ona p_- -.
Z_a, Z_b	. Impedàncies acústiques a la secció d'una discontinuïtat per a cadascun dels trams "a" i "b" que la delimiten.
Z_{eo}	. Impedància acústica d'extrem obert.
Z_{et}	. Impedància acústica d'extrem tancat.
Z_f	. Impedància acústica d'un forat obert a la secció d'unió amb el tub de l'instrument.
Z_{fo}	. Impedància acústica d'un forat obert a la secció de sortida.

- Z_s, Z_p . Impedàncies en sèrie i en paral·lel emprades en la modelització del comportament acústic d'un forat.
- Z_0 . Impedància característica.
- α_a, α_b . Angles d'obertura dels trams cònics "a" i "b" que delimiten un canvi de conicitat.
- α_0 . Exponent de la funció de reflexió en un extrem obert que desenboca en absència de pla.
- χ . Mòdul de compressibilitat de l'aire.
- χ_0 . Part imaginària de la impedància acústica en un extrem obert que desenboca en pla infinit.
- χ'_0 . Part imaginària de la impedància acústica en un extrem obert que desenboca en absència de pla.
- $\delta(t)$. Funció impuls unitari de Dirac.
- ϕ . Angle de fase temporal.
- γ . Relació de calors específiques.
- η . Coeficient de viscositat de l'aire.
- φ_+, φ_- . Ones solució de l'equació d'ona.
- λ . Longitud d'ona.
 . Conductivitat tèrmica de les parets de l'instrument.
- ν . Exponent de la funció de reflexió deguda a un canvi de conicitat, i en un extrem tancat.

θ	. Variable d'integració en les integrals de convolució.
θ_0	. Part real de la impedància acústica en un extrem obert que desenhoca en pla infinit.
θ'_0	. Part real de la impedància acústica en un extrem obert que desenhoca en absència de pla.
ρ_0	. Densitat mitjana de l'aire.
$\hat{\sigma}(\omega)$	. Funció freqüencial d'esmoreïment.
$\sigma(t)$	. Funció temporal d'esmoreïment.
σ_q	. Funció d'esmoreïment convolucionada amb una ona quadrada.
τ	. Retard. . Variable d'integració en les integrals de convolució.
v	. Coeficient d'acoblament entre un forat tapat i la columna d'aire.
ω	. Freqüència angular.
ξ	. Constant de la funció temporal d'esmoreïment.
ψ	. Angle de fase espacial.
ζ	. Coeficient complex d'esmoreïment.
ζ_0	. Constant d'esmoreïment.
ΔL	. Discretització espacial.
$\Delta T, \Delta t$	. Resolució temporal.
$\Phi = r p$	. Pressió reduïda d'una ona esfèrica.

$\Phi(y)$. Funció intergral de Fresnel.

Γ . Funció Gamma.

INTRODUCCIÓ.

INTRODUCCIÓ.

L'estudi de l'acústica dels instruments de vent de la cobla és una de les línies de recerca que es duen a terme al Laboratori de Mecànica i Vibracions de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona. En els darrers anys s'han realitzat nombrosos treballs que s'hi relacionen i s'ha avançat en el coneixement d'aquest instruments.

Fruit d'aquests treballs són les tesis de S. Cardona, "Contribució a l'estudi de l'acústica de la tenora" (Cardona 1980), i de J. Vivancos, "Contribució a l'estudi de l'acústica del flabiol" (Vivancos 1981), així com un seguit d'articles publicats per l'equip del Laboratori i de comunicacions a congressos.

En les dues tesis esmentades els autors caracteritzen el funcionament de l'instrument per als sons mantinguts, és a dir per al règim estacionari, mitjançant l'anàlisi espectral, tant del so a l'interior de l'instrument com del so radiat, i la mesura de la impedància acústica de la columna d'aire a l'interior de l'instrument. També basteixen models matemàtics, basats en el càlcul teòric de la impedància acústica, que permeten determinar les freqüències pròpies de la columna d'aire i a partir de la seva anàlisi, establir quins són els canvis a introduir en el disseny de l'instrument per a millorar el seu comportament, tant pel que fa a l'afinació com pel que fa a l'espontaneïtat, entenent com a tal la facilitat amb que s'estableix un so mantingut i estable en excutar-se una nota.

Els autors no aborden però l'estudi del mecanisme d'autoexcitació que genera el so, una doble canya en el cas del tible i la tenora i un bisell en el cas del flabiol, ni l'estudi del funcionament transitori de l'instrument.

L'estudi del mecanisme d'autoexcitació i del seu acoblament dinàmic amb el tub de l'instrument, per al cas de la tenora, és el contingut de la tesi desenvolupada per A. Barjau (Barjau 1987). Com a resultat del seu treball es disposa d'un model matemàtic global que permet simular el funcionament de la tenora i preveure així com poden afectar els canvis en el seu disseny.

L'estudi experimental del funcionament transitori del tible i la tenora, i l'estudi de la caracterització temporal del comportament acústic d'aquests

instruments, són l'objecte de la primera part del present treball. Els aspectes inclosos en aquest estudi són els següents:

En primer lloc s'han analitzat els transitoris d'atac, entenent-se com a tals els transitoris que es produeixen entre l'instant en que s'inicia l'execució d'una nota i l'instant en que s'assoleix el règim estacionari. L'interès en conèixer i analitzar els atacs rau en la seva relació amb l'espontaneïtat de l'instrument i en el fet que els atacs juguen un paper important en el reconeixement del so produït per un instrument musical.

L'anàlisi s'ha realitzat amb les dades obtingudes mitjançant la mesura de la pressió a l'interior de l'instrument en un punt proper a la canya, en condicions reals de funcionament. Per això s'ha comptat amb la col.laboració de diferents instrumentistes. Els registres de pressió així obtinguts han permès caracteritzar i classificar els tipus d'atac propis del tible i la tenora, i dur a terme l'estudi de l'espontaneïtat emprant diferents formes d'anàlisi -observació directa i anàlisi espectral- i comptant amb la descripció, des del punt de vista musical, que de cada atac en faci l'instrumentista.

En segon lloc s'ha aprofundit en l'estudi de la resposta impulsional de la columna d'aire a l'interior de l'instrument. La resposta impulsional defineix totalment el comportament dinàmic de la columna d'aire i el seu caràcter transitori també la relaciona estretament amb l'espontaneïtat.

Per a l'estudi s'ha desenvolupat una tècnica experimental per a la determinació directa de la resposta impulsional, i s'ha bastit un model matemàtic per a la seva determinació teòrica, basat en l'efecte de les discontinuïtats del perfil interior del tub sobre l'ona de pressió. Aquest model es compara amb el ja existent basat en el càlcul de la impedància acústica i l'aplicació de la Transformada Inversa de Fourier.

Finalment, i igual que en el cas dels atacs, s'ha relacionat la resposta impulsional amb l'espontaneïtat de l'instrument.

La segona part del treball consisteix en l'estudi de l'afinació del tible i la tenora en condicions reals de funcionament, estudi mai dut a terme fins ara. Per a l'estudi s'empren les dades obtingudes mitjançant un instrument que permet

mesurar el període del fonamental del so emès en temps real. Aquest instrument, basat en un microprocessador, ha estat desenvolupat i construït per l'autor al Laboratori de Mecànica i Vibracions de l'E.T.S.E.I.B.

La mesura en temps real permet analitzar la dependència de l'afinació respecte diversos factors que hi intervenen, com ara: El caràcter i intensitat que el músic dona a cada nota. La forma de l'atac de cada nota -picat, lligat, etc.-. I la presència del "vibrat" que produeix intencionadament el músic per tal de millorar la qualitat musical de so.

A més, un aspecte particularment interessant pel que fa als instruments populars catalans és la determinació del diapasó amb que toca cada instrumentista.

El diapasó és el to de referència, definit per la freqüència del fonamental del so, a partir del qual es basteix tota l'escala musical. Aquest no està fixat i cada cobla o grup instrumental n'empra un de diferent comprès entre el diapasó "normal", que estableix com a referència el La_3 de 440 Hz de freqüència fonamental, i l'anomenat diapasó "brillant", no establert de manera precisa, que es situa entre un quart de to i un semitó per sobre del normal. Aquest darrer diapasó és adoptat en més o menys grau per nombroses cobles perquè és l'emprat per les cobles empordaneses, i a causa del caràcter més viu que imprimeix a la interpretació a l'aire lliure de la música de dansa -principalment la sardana-.

Amb les mesures realitzades es vol establir la diferència real existent entre ambdós diapasos.

1. DESCRIPCIÓ DELS INSTRUMENTS.

1.1. DESCRIPCIÓ MUSICAL.

1.2. MIDES GEOMÈTRIQUES I MATERIALS CONSTRUCTIUS.

1.3. PRINCIPI DE FUNCIONAMENT.

1. DESCRIPCIÓ DELS INSTRUMENTS.

1.1. DESCRIPCIÓ MUSICAL.

El tible i la tenora són instruments de vent de la família de la fusta que deriven directament de les xeremies medievals emprades arreu d'Europa fins a les darreries del segle XVII. Amb la renaixença de la sardana a finals del segle passat les antigues xeremies evolucionaren fins esdevenir els instruments actuals. En concret s'afegiren claus per facilitar la digitació i s'estengué la seva tessitura.

Ambdós instruments, que es poden observar a la figura 1.1-1-, són de cos recte i de perfil interior aproximadament cònic, i empren una doble canya com a dispositiu d'autoexcitació. L'execució de les diferents notes s'obté en destapar successivament els forats laterals de l'instrument.

La tenora és un instrument transpositor afinat en Si^b , la qual cosa significa que el Do de la tenora equival al Si^b del piano pel que fa a la freqüència del fonamental de la nota. La nota més greu que permet executar és el $\text{Fa}_2^\#$ i la seva tessitura s'estén fins al Sol_5 . Presenta per tant una extensió superior a les tres octaves, encara que les notes més agudes no s'acostumen a emprar.

Les notes més usals es distribueixen en dos registres. El primer comprén des del $\text{Fa}_2^\#$ al $\text{Do}_4^\#$ i el segon des del Re_4 al $\text{Do}_5^\#$. Les notes del segon registre s'executen repetint la mateixa digitació emprada en les notes del primer registre i destapant un dels anomenats "forats de registre" dels dos de que disposa la tenora. Per sobre del $\text{Do}_5^\#$ existeix un tercer registre -fins al Sol_5 - que s'executa amb una digitació diferent a les dels altres dos i més complexa.

La taula 1.1-I correspon a l'afinació de la tenora en diapasó "normal" - Si_3 de 440 Hz de freqüència fonamental- i en un diapasó "brillant" establert 1/4 de to per sobre del normal. També es representa l'equivalència amb les notes del piano. Les figures 1.1-2 i 1.1-3 mostren la tablatura de la tenora -posició del dits- i la seva digitació -seqüència de forats oberts i tapats- respectivament. En la digitació els forats s'han numerat segons l'ordre del més proper al més

allunyat de l'extrem obert de l'instrument.

El tible és també un instrument transpositor, en aquest cas afinat en Fa, el qual sona una quinta més agut que la tenora. Així mentre el La_2 de la tenora equival al Sol_2 del piano, el La_2 del tible equival al Re_3 del piano. La seva nota més greu és el La_2 i la seva tessitura arriba fins al Sol_5 a l'igual que en la tenora. Presenta per tant una extensió quasi de tres octaves. L'instrument també presenta tres registres: el primer comprén des del La_2 al $Do_4^\#$, el segon des del Re_4 al Do_5 i el tercer des del $Do_5^\#$ al Sol_5 . El pas del primer al segon també s'aconsegueix mitjançant l'actuació de forats de registre.

La taula 1.1-II mostra l'afinació del tible en diapasó normal i diapasó brillant, així com la seva equivalència amb l'escala temperada normal. I les figures 1.1-4 i 1.1-5 mostren respectivament la seva tablatura i la seva digitació.

1.2. MIDES GEOMÈTRIQUES I MATERIALS CONSTRUCTIUS.

El tible i la tenora presenten tres parts ben diferenciades, les quals es poden observar a la figura 1.2-1:

- . Una part central, generalment subdividida en dos cossos, de perfil aproximadament cònic truncat i construïda de fusta.
- . Un pavelló, de conicitat progressivament creixent, que acaba en l'extrem de sortida de l'instrument. En la tenora és metàl·lic -de llautó o d'alpaca- i en el tible és de fusta.
- . I un tudell, peça curta de llautó de conicitat elevada que constitueix l'extrem d'entrada de l'instrument en el qual es col·loca la canya. La secció d'entrada s'anomena "gra del tudell".

La fusta normalment emprada en la construcció és de ginjoler, si bé en ocasions s'han construït instruments amb altres fustes, entre elles el boix, el banús o el palissandre. Fins hi tot han existit tenores de construcció totalment metàl·lica.

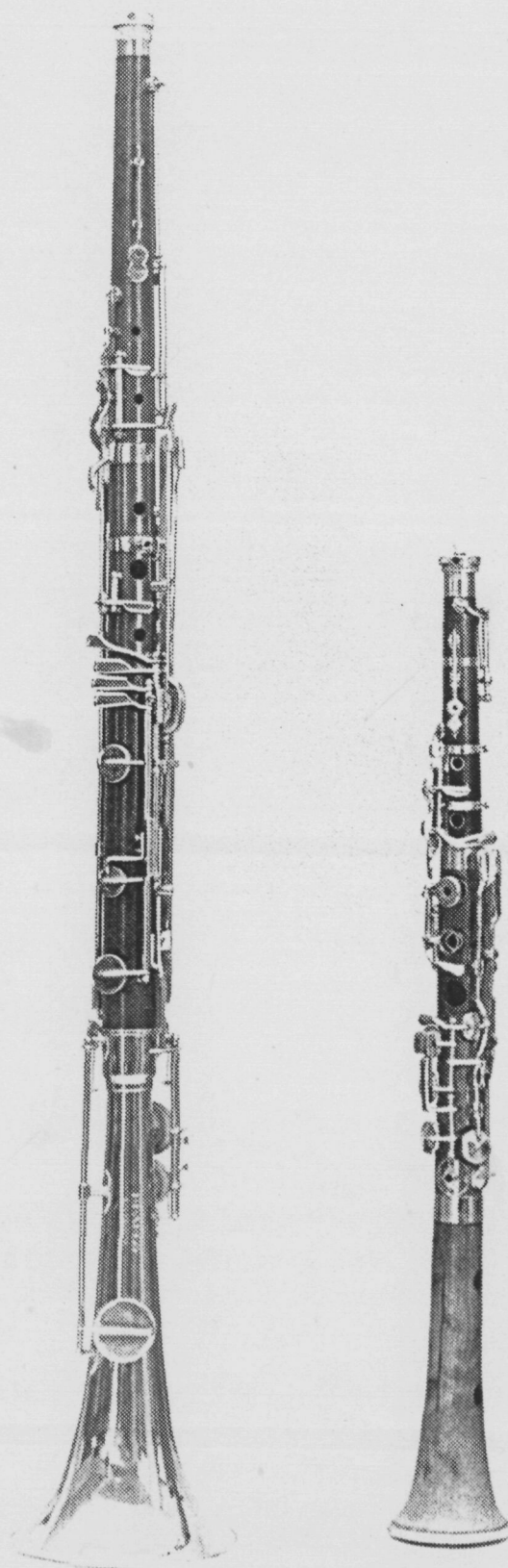


Fig. 1.1-1 Tenora "Pardo" i tible "Pardo" actuals.

Taula 1.1-I Afinació normal i brillant de la tenora. Equivalència amb les notes del piano.

TENORA	normal (Hz)	brillant (Hz)	PIANO	
Fa ₂ [#]	164,8	169,6	Mi ₂	E ₃
Sol ₂	174,6	179,7	Fa ₂	F ₃
Sol ₂ [#]	185,0	190,4	Fa ₂ [#]	F ₃ [#]
La ₂	196,0	210,7	Sol ₂	G ₃
Si ₂ ^b	207,7	213,7	Sol ₂ [#]	G ₃ [#]
Si ₂	220,0	226,4	La ₂	A ₃
Do ₃	233,1	239,9	Si ₂ ^b	B ₃ ^b
Do ₃ [#]	246,9	254,2	Si ₂	B ₃
Re ₃	261,6	269,3	Do ₃	C ₄
Re ₃ [#]	277,2	285,3	Do ₃ [#]	C ₄ [#]
Mi ₃	293,7	302,3	Re ₃	D ₄
Fa ₃	311,1	320,2	Re ₃ [#]	D ₄ [#]
Fa ₃ [#]	329,6	339,3	Mi ₃	E ₄
Sol ₃	349,2	359,5	Fa ₃	F ₄
Sol ₃ [#]	370,0	380,8	Fa ₃ [#]	F ₄ [#]
La ₃	392,0	403,5	Sol ₃	G ₄
Si ₃ ^b	415,3	427,5	Sol ₃ [#]	G ₄ [#]
Si ₃	440,0	452,9	La ₃	A ₄
Do ₄	466,2	479,8	Si ₃ ^b	B ₄ ^b
Do ₄ [#]	493,9	508,4	Si ₃	B ₄
Re ₄	523,3	538,6	Do ₄	C ₅
Re ₄ [#]	554,4	570,6	Do ₄ [#]	C ₅ [#]
Mi ₄	587,3	604,5	Re ₄	D ₅
Fa ₄	622,3	640,5	Re ₄ [#]	D ₅ [#]
Fa ₄ [#]	659,3	678,6	Mi ₄	E ₅
Sol ₄	698,5	718,9	Fa ₄	F ₅
Sol ₄ [#]	740,0	761,7	Fa ₄ [#]	F ₅ [#]
La ₄	784,0	807,0	Sol ₄	G ₅
Si ₄ ^b	830,6	854,9	Sol ₄ [#]	G ₅ [#]
Si ₄	880,0	905,8	La ₄	A ₅
Do ₅	932,3	959,6	Si ₄ ^b	B ₅ ^b
Do ₅ [#]	987,8	1016,7	Si ₄	B ₅

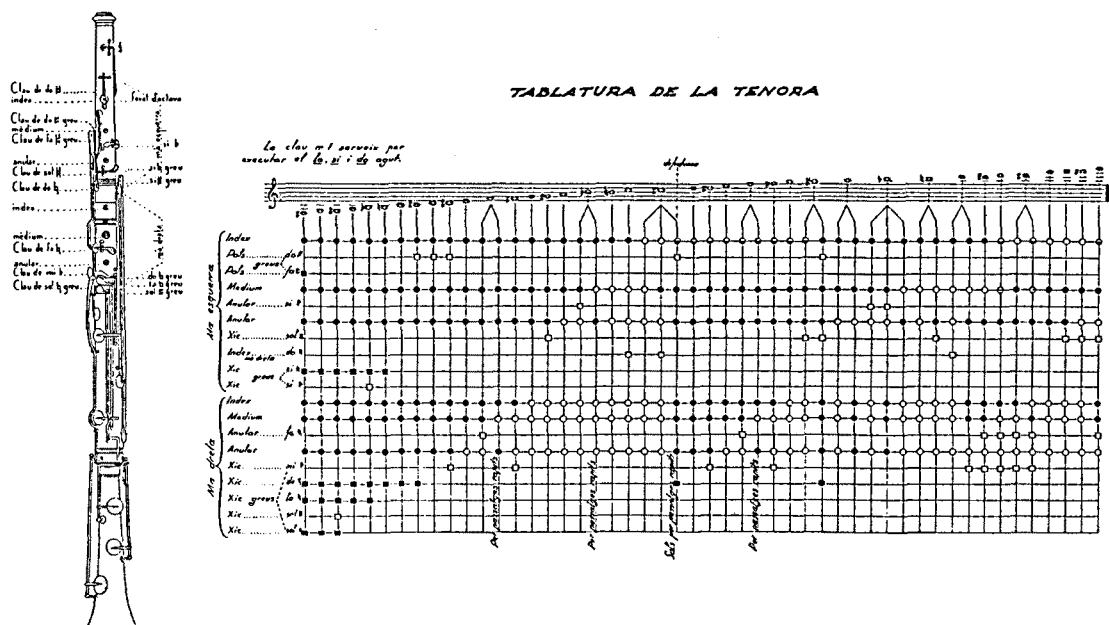


Fig. 1.1-2 Tablatura de la tenora.

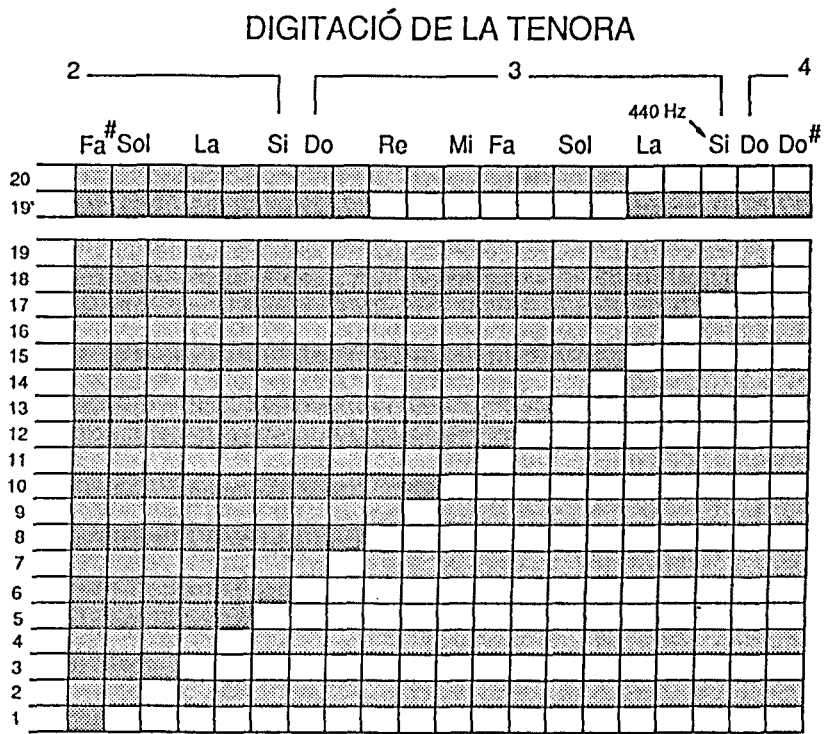


Fig. 1.1-3 Digitació de la tenora. Blanc: forats oberts.
Trama fosca: forats tapats que romanen oberts quan no s'hi actua.
Trama clara: forats tapats que romanen tapats quan no s'hi actua.

Taula 1.1-II Afinació normal i brillant del tible. Equivalència amb les notes del piano.

TIBLE	normal (Hz)	brillant (Hz)	PIANO	
La ₂	293,7	302,3	Re ₃	D ₄
La ₂ [#]	311,1	320,2	Re ₃ [#]	D ₄ [#]
Si ₂	329,6	339,3	Mi ₃	E ₄
Do ₃	349,2	359,5	Fa ₃	F ₄
Do ₃ [#]	370,0	380,8	Fa ₃ [#]	F ₄ [#]
Re ₃	392,0	403,5	Sol ₃	G ₄
Re ₃ [#]	415,3	427,5	Sol ₃ [#]	G ₄ [#]
Mi ₃	440,0	459,2	La ₃	A ₄
Fa ₃	466,2	479,8	La ₃ [#]	A ₄ [#]
Fa ₃ [#]	493,9	508,4	Si ₃	B ₄
Sol ₃	523,3	538,6	Do ₄	C ₅
Sol ₃ [#]	554,4	570,6	Do ₄ [#]	C ₅ [#]
La ₃	587,3	604,5	Re ₄	D ₅
La ₃ [#]	622,3	640,5	Re ₄ [#]	D ₅ [#]
Si ₃	659,3	678,6	Mi ₄	E ₅
Do ₄	698,5	718,9	Fa ₄	F ₅
Do ₄ [#]	740,0	761,7	Fa ₄ [#]	F ₅ [#]
Re ₄	784,0	807,0	Sol ₄	G ₅
Re ₄ [#]	830,6	854,9	Sol ₄ [#]	G ₅ [#]
Mi ₄	880,0	905,8	La ₄	A ₅
Fa ₄	932,3	959,6	La ₄ [#]	A ₅ [#]
Fa ₄ [#]	987,8	1016,7	Si ₄	B ₅
Sol ₄	1046,5	1077,2	Do ₅	C ₆
Sol ₄ [#]	1108,7	1141,2	Do ₅ [#]	C ₆ [#]
La ₄	1174,7	1209,1	Re ₅	D ₆
La ₄ [#]	1244,5	1281,0	Re ₅ [#]	D ₆ [#]
Si ₄	1318,5	1357,1	Mi ₅	E ₆
Do ₅	1396,9	1437,8	Fa ₅	F ₆
Do ₅ [#]	1480,0	1523,4	Fa ₅ [#]	F ₆ [#]
Re ₅	1568,0	1613,9	Sol ₅	G ₆
Re ₅ [#]	1661,2	1709,9	Sol ₅ [#]	G ₆ [#]
Mi ₅	1760,0	1811,6	La ₅	A ₆
Fa ₅	1864,7	1919,3	La ₅ [#]	A ₆ [#]
Fa ₅ [#]	1975,5	2033,4	Si ₅	B ₆
Sol ₅	2039,0	2154,3	Do ₆	C ₇

Les mides geomètriques del perfil interior del tible i de la tenora no presenten un patró únic. Varien notablement d'un constructor a l'altre, i fins i tot instruments provinents d'un mateix constructor presenten diferències apreciables. La figura 1.2-2 mostra la geometria del perfil interior i la situació dels forats d'una tenora del constructor Pardo de la Bisbal, de construcció recent, i la taula 1.2-I recull les seves dimensions. La situació del forats i de les diferents discontinuïtats del perfil interior s'ha definit per mitjà de la distància que els separa de l'extrem obert del pavelló. El pavelló s'ha modelitzat mitjançant una successió de trams cònics. La figura 1.2-3 i la taula 1.2-II mostren també la geometria i les dimensions d'un tible també del constructor Pardo.



Fig. 1.2-1 Elements components del tible.

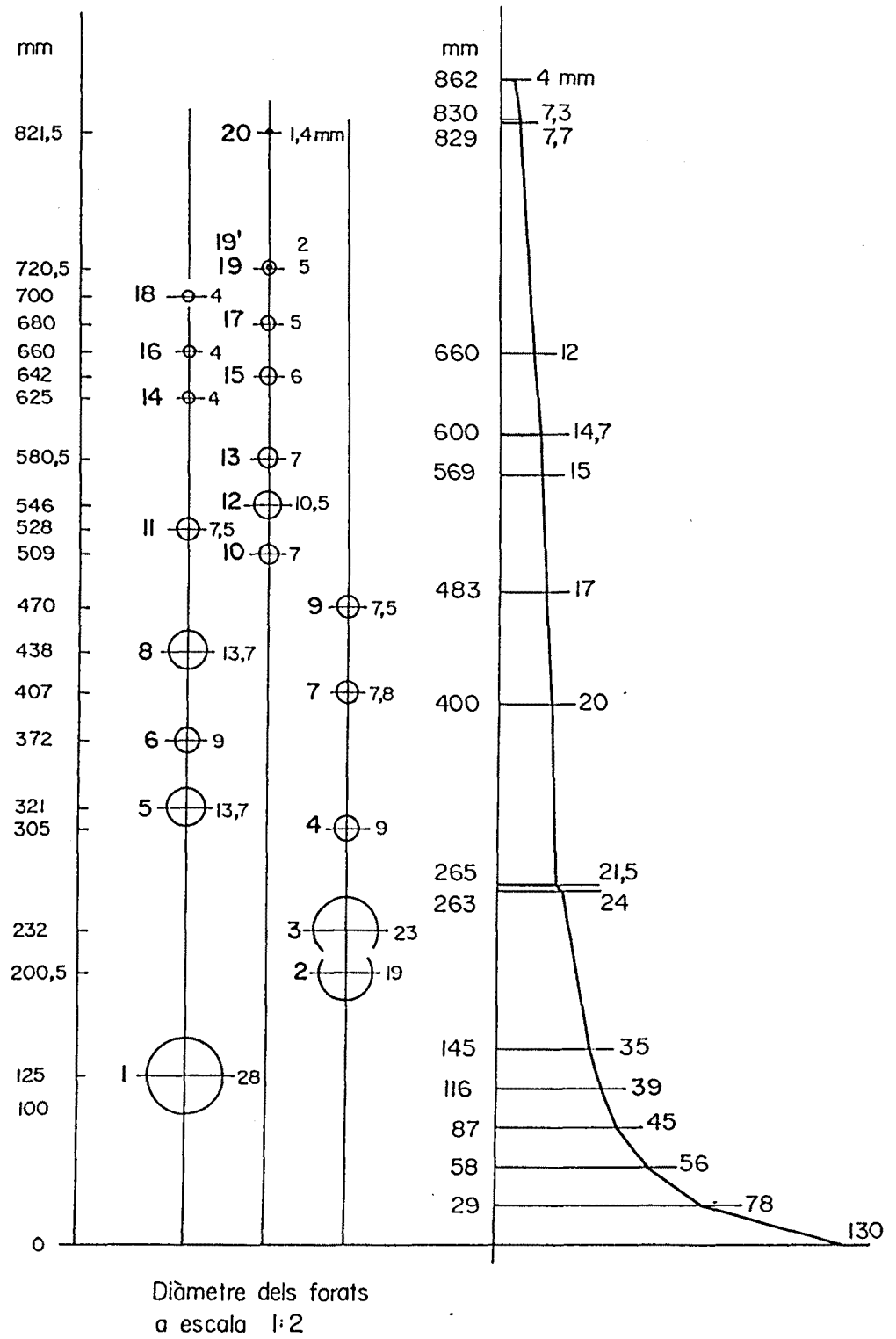


Fig. 1.2-2 Perfil interior i forats d'una tenora "Pardo" actual.

Taula 1.2-I Mides del perfil i dels forats d'una tenora "Pardo" actual.

l_t	d_t
—	130,0
29,0	78,0
58,0	56,0
87,0	45,0
116,0	39,0
145,0	35,0
236,0	24,0
265,0	21,5
400,0	20,0
483,0	17,0
569,0	15,0
600,0	14,7
660,0	12,0
829,0	7,7
830,0	7,3
862,0	4,0

	l_f	d_f	h_f
1	125,0	28,0	5,5
2	200,5	19,0	5,0
3	232,0	23,0	4,5
4	305,0	9,0	4,0
5	321,0	13,7	3,5
6	372,0	9,0	4,3
7	407,0	7,8	4,5
8	438,0	13,7	3,5
9	470,0	7,5	4,5
10	509,0	7,0	6,0
11	528,0	7,5	5,5
12	546,0	10,5	6,0
13	580,5	7,0	6,0
14	625,0	4,0	6,5
15	642,0	6,0	7,0
16	660,0	4,0	7,0
17	680,0	5,0	7,0
18	700,0	4,0	7,0
19	720,5	5,0	7,0
19'	720,5	2,0	3,0
20	821,5	1,4	7,0

l_t = distància d'una secció a l'extrem obert del pavelló en mm.
 d_t = diàmetre de la secció en mm.
 l_f = distància de l'eix del forat a l'extrem obert del pavelló en mm.
 d_f = diàmetre del forat en mm.
 h_f = alçària del forat en mm.

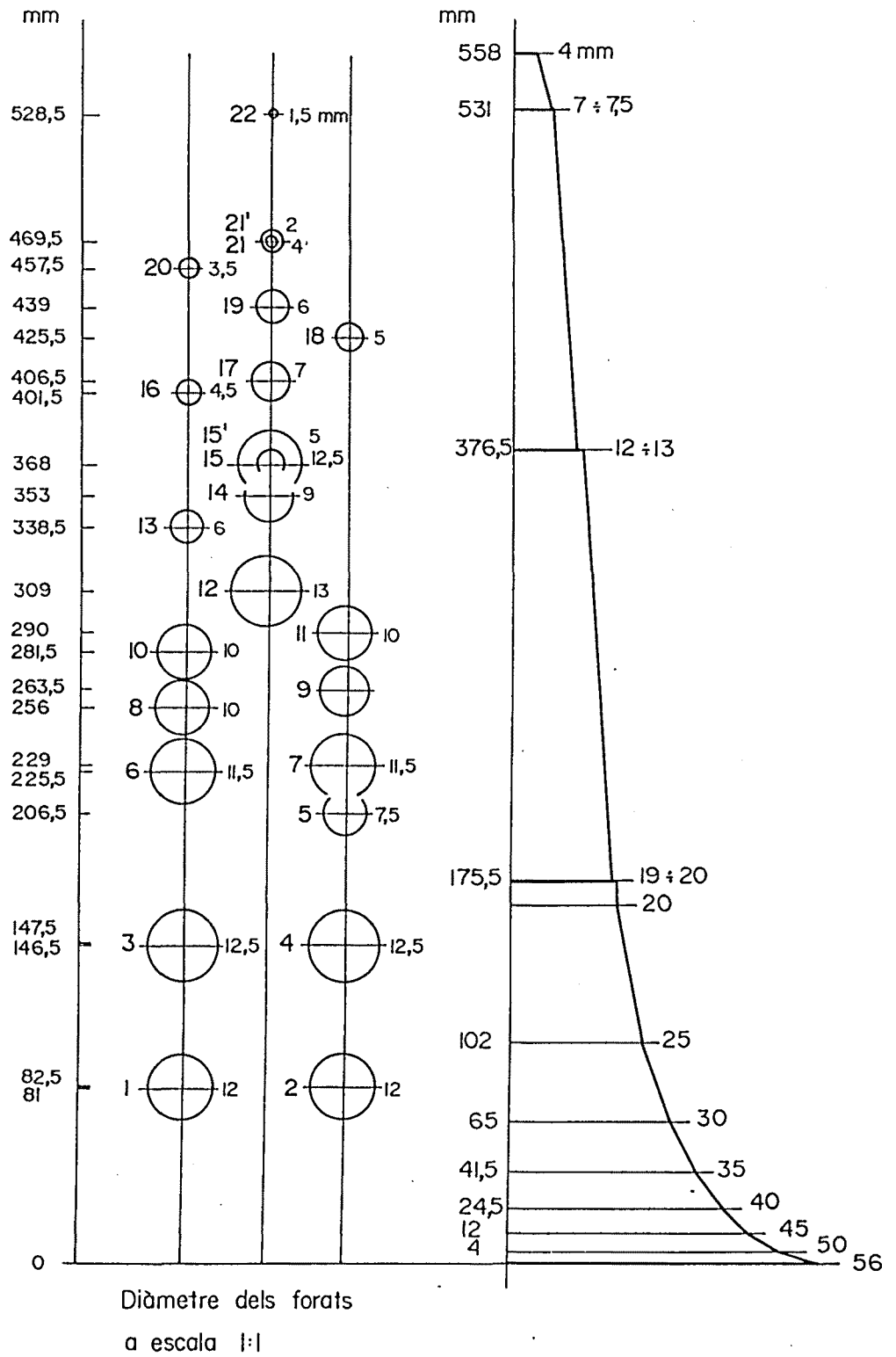


Fig. 1.2-3 Perfil interior i forats d'un tible "Pardo" actual.

Taula 1.2-II Mides del perfil i dels forats d'un tible "Pardo" actual.

l_t	d_t
—	56,0
4,0	50,0
12,0	45,0
24,5	40,0
41,5	35,0
65,0	30,0
102,0	25,0
165,0	20,0
175,5	20,0
175,5	19,0
376,5	13,0
376,5	12,0
531,0	7,5
531,0	7,0
558,0	4,0

	l_f	d_f	h_f
1	81,0	12,0	3,3
2	82,5	12,0	3,3
3	146,5	12,5	4,3
4	147,5	12,5	4,3
5	206,5	7,5	3,7
6	225,5	11,5	4,0
7	229,0	11,5	3,5
8	256,0	10,0	3,7
9	263,5	9,0	4,3
10	281,5	10,0	3,8
11	290,0	10,0	4,5
12	309,0	13,0	5,5
13	338,5	6,0	7,0
14	353,0	9,0	4,6
15	368,0	12,5	4,4
15'	368,0	5,0	8,0
16	401,5	4,5	5,6
17	406,5	7,0	6,1
18	425,5	5,0	5,7
19	439,0	6,0	6,1
20	457,5	3,5	5,4
21	469,5	4,0	5,6
21'	469,5	2,0	6,0
22	528,5	1,5	5,7

l_t = distància d'una secció a l'extrem obert del pavelló en mm.

d_t = diàmetre de la secció en mm.

l_f = distància de l'eix del forat a l'extrem obert del pavelló en mm.

d_f = diàmetre del forat en mm.

h_f = alçària del forat en mm.

1.3. PRINCIPI DE FUNCIONAMENT.

El tible i la tenora són instruments de règim acústic autoexcitat en els quals l'amplitud del so que produeixen es manté gràcies a l'aportament d'energia que proporciona el cabal d'aire que entra a l'instrument, aportament que compensa les pèrdues d'energia degudes a l'esmoreïment intern i a la radiació d'energia acústica que té lloc a través dels forats laterals oberts i de l'extrem obert.

L'aportament d'energia es controla per mitjà del mecanisme d'autoexcitació que s'estableix entre la doble canya i la columna d'aire de l'instrument. En primera aproximació la canya, formada per dues llegüetes elàstiques -figura 1.3-1-, varia la secció de pas del cabal entrant en funció de les fluctuacions de pressió que el règim acústic de la columna d'aire -l'ona interna- presenta a la secció d'entrada de l'instrument. D'aquesta manera es produeix una fluctuació de cabal entrant que reforça l'amplitud de l'ona interna.

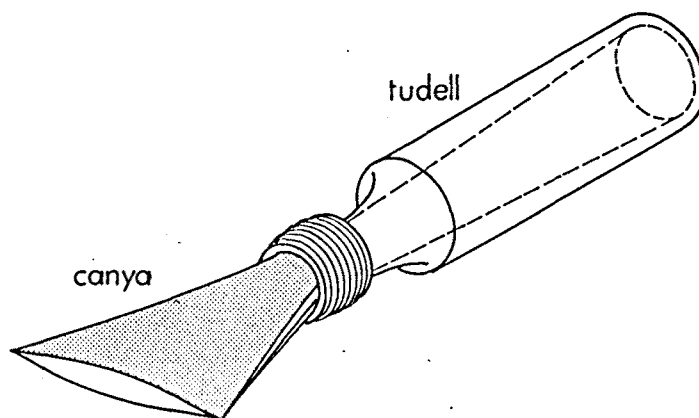


Fig. 1.3-1 Conjunt canya-tudell.

Un estudi detallat de com es produeix l'autoexcitació en el tible i la tenora, a nivell qualitatiu, es presenta al capítol 6. A. Barjau presenta a la seva tesi un estudi quantitatiu de l'autoexcitació en forma de model matemàtic que permet simular el funcionament global de l'instrument (Barjau 1987).

En estudiar la dinàmica de la columna d'aire de l'instrument, es pot prescindir del cabal continu d'aire entrant, el qual té un efecte secundari en el comportament acústic. Considerant aquest fet, el règim acústic estacionari es pot descriure en primera aproximació com una superposició d'ones estacionàries amb longituds d'ona definides d'acord amb les condicions d'extrem que imposen les seccions d'entrada i de sortida de l'instrument. Aquestes condicions es refereixen als valors que poden assolir la pressió i la velocitat en aquests indrets. En parlar de pressió i de velocitat en el context d'aquest treball s'ha d'entendre que es tracta de les components acústiques d'ambdues variables, es a dir de la seva part fluctuant.

Si es prescindeix del fenomen de l'autoexcitació i de les pèrdues d'energia per radiació i esmorteïment intern, l'extrem d'entrada de l'instrument es comporta molt aproximadament com un extrem tancat, en el qual la pressió pot assolir amplituds elevades mentre la velocitat, que es presenta amb un defasatge de $1/4$ de longitud d'ona respecte de la pressió, és pràcticament nul·la. Pel que fa a l'extrem obert, és la velocitat qui pot assolir amplituds elevades, mentre la pressió és nul·la en primera aproximació.

Les ones estacionàries es poden descriure en aquest cas com la superposició de dues ones iguals, que es propaguen en sentits oposats a l'interior de l'instrument i defasades $1/2$ longitud d'ona a l'extrem obert. L'ona que es propaga vers l'extrem obert es reflecteix en arribar a la secció de sortida, i s'inverteix produïnt l'ona que es propaga en sentit oposat. El fet que la radiació d'energia sigui nul·la implica que l'amplitud de l'ona reflectida sigui igual a la de l'ona incident i per tant que la superposició d'ambdues estableixi una amplitud de pressió nul·la en aquest indret. Pel que fa a l'ona que es propaga vers l'extrem tancat, aquesta es reflecteix en arribar-hi sense invertir-se i com a conseqüència la superposició de l'ona reflectida i l'ona incident produeix una amplitud de pressió màxima.

Les condicions d'extrem esmentades determinen per tant la sèrie d'ones

estacionàries que es poden establir. Totes elles presentaran un màxim en l'amplitud de la pressió a la secció d'entrada -antinode de pressió- i una amplitud nul·la a la secció de sortida -node de pressió-. Cadascuna d'aquestes ones descriu un mode propi de vibració de la columna d'aire i la seva freqüència pròpia s'apropa a la d'un múltiple de la del primer mode -el de freqüència pròpia més baixa-. La figura 1.3-2 il·lustra la distribució d'amplituds de pressió a l'interior d'un tub cònic truncat per al cas dels quatre primers modes de la columna d'aire.

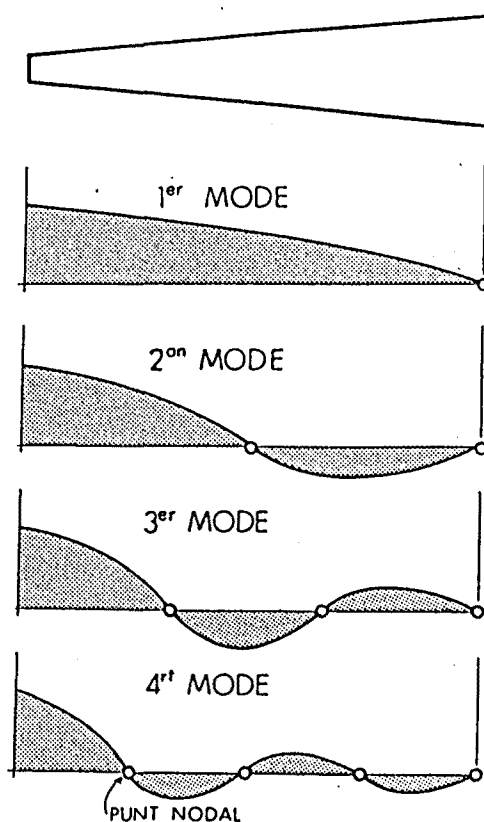


Fig. 1.3-2 Modes propis de vibració amb la hipòtesi de pressió nul·la a l'extrem obert.

En una segona aproximació, bo i acceptant la hipòtesi de radiació negligible, es pot considerar que la longitud d'ona es funció de la longitud de la columna d'aire més una correcció, anomenada *correcció d'extrem*, definida per la localització d'un hipotètic node de pressió situat més enllà de l'extrem de sortida, que s'anomena *extrem acústic*. La figura 1.3-3 mostra de nou la distribució de les amplituds de pressió per als quatre primers modes del tub cònic truncat, en aquest cas considerant la correcció d'extrem.

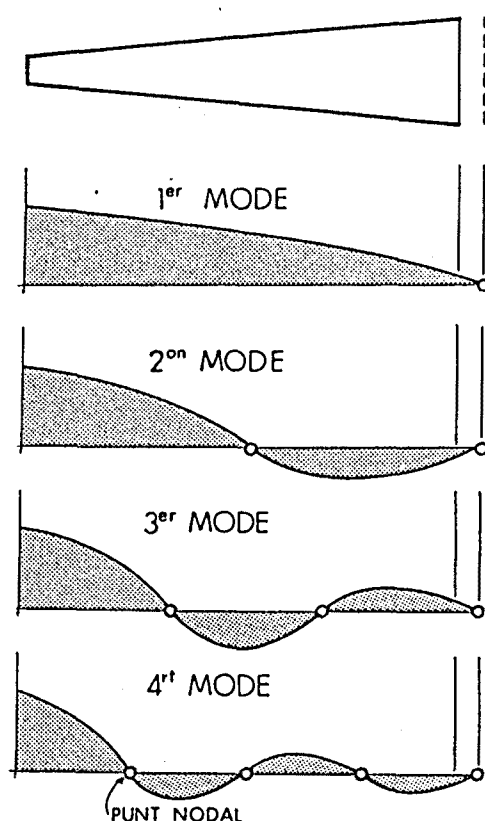


Fig. 1.3-3 Modes propis de vibració amb la hipòtesi de correcció d'extrem.

En considerar la presència de radiació d'energia i d'esmoreïment, el règim acústic de cada mode, si bé s'aproxima al d'una ona estacionària, presenta diferències. La radiació d'energia a través de l'extrem obert implica que part de

l'ona incident es transmeti a l'exterior i per tant que l'ona reflectida sigui d'amplitud més petita que l'ona incident, presentant a més un defasatge diferent del de $1/2$ longitud d'ona. Aquest fet fa que la pressió a l'anomenat extrem acústic no sigui nul·la, i que no s'estableixi una ona estacionària clarament definida. A més l'esmoreïment intern atenua progressivament l'amplitud de les ones i afegeix un retard a mesura que aquestes avancen. Amb tot això el règim acústic ja no presenta seccions nodals clarament definides sinó zones d'amplitud mínima.

La radiació d'energia a l'extrem obert augmenta a mesura que augmenta la freqüència. Per aquesta raó els modes propis de freqüència més elevada radien més i per tant el seu règim acústic s'allunya encara més del model d'ona estacionària. Per sobre d'una certa freqüència, anomenada *freqüència de tall*, la reflexió és pràcticament nul·la i per tant tota l'energia acústica és radiada cap a l'exterior. A partir de la freqüència de tall deixen d'establir-se ressonàncies de la columna d'aire.

Una descripció més detallada del règim acústic estacionari definit com a superposició de modes es pot trobar a la tesi de S. Cardona (Cardona 1980). En ella s'analitza la influència de diferents factors en la forma i la freqüència pròpia de cada mode: La conicitat i el grau de truncament del tub de l'instrument, la influència del pavelló i la variació de les freqüències pròpies en destapar els forats laterals emprats per establir l'afinació. Gran part del treball realitzat per S. Cardona ha servit com a punt d'inici del treball presentat en aquesta tesi.

Finalment, si es considera la presència del mecanisme d'autoexcitació, la condició d'extrem a la secció d'entrada varia notablement i la seva descripció esdevé força complexa. En ser no lineal el comportament del mecanisme, la descripció del règim acústic com a superposició de modes deixa de ser adequada i cal recórrer a la descripció de l'ona interna en el domini temporal.

El treball realitzat correspon a l'estudi en el domini temporal dels diferents aspectes relacionats amb el funcionament del tible i la tenora, fent especial esment en el transitori que s'estableix prèviament al règim estacionari.

2. CAPTACIÓ I ANÀLISI DELS TRANSITORIS D'ATAC.

2.1. PLANTEJAMENT I OBJECTIUS.

2.2. EL MUNTATGE EXPERIMENTAL.

2.3. ELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

- . Els atacs de la tenora.
- . Els atacs del tible.

2. CAPTACIÓ I ANÀLISI DELS TRANSITORIS D'ATAC.

2.1. PLANTEJAMENT I OBJECTIUS.

Els transitoris d'atac, que per abreujar s'anomenen a partir d'ara "atacs", són els transitoris que tenen lloc entre l'instant en que el músic comença a executar una nota i l'instant en que s'arriba a un règim estacionari, es a dir en que s'arriba a obtenir un so estable i mantingut.

L'interès que presenta el seu estudi cal cercar-lo en els següents fets: En primer lloc perquè la forma i durada de l'atac és reflex de la facilitat amb que s'estableix el règim estacionari, i per tant, de l'espontaneïtat de l'instrument. I en segon lloc perquè els atacs juguen un paper important en el reconeixement d'un so musical (Pollard 1982). Aquest fet és particularment interessant en el cas del tible i la tenora per quant la tècnica d'execució musical d'aquests instruments ha conservat formes d'atac que ja no s'empren en altres instruments anàlegs -xirimies, oboes, etc.- i a les que correspon bona part de la identitat dels seus sons.

Considerant aquests dos fets l'estudi dels atacs s'ha dirigit cap a la caracterització i classificació dels atacs propis del tible i la tenora, i a l'us de l'anàlisi dels atacs com a eina per a l'estudi de l'espontaneïtat.

La tècnica experimental emprada ha consistit en la detecció i l'enregistrament de la pressió a l'interior de l'instrument en una secció el més propera possible a la canya, mentre un instrumentista executava diferents notes amb diverses formes d'atac. La localització escollida respon al fet que la pressió en aquesta secció descriu com es produeix el procés d'acoblament entre la canya i la columna d'aire de l'interior de l'instrument. Aquesta pressió és la que controla el moviment de la canya i per tant el cabal d'aire que entra a l'instrument, establint així el mecanisme d'autoexcitació que porta al règim estacionari. De la facilitat amb que es produeixi l'acoblament descrit en depèn l'espontaneïtat.

Els registres temporals de pressió obtinguts s'han analitzat mitjançant l'observació directa i l'observació de l'evolució temporal del contingut espectral

del transitori. Aquesta darrera tècnica d'anàlisi permet conèixer quins són els components harmònics més importants a mesura que evoluciona el transitori, fet que afecta l'espontaneïtat i ajuda a comprendre el funcionament de l'autoexcitació.

Finalment, amb aquestes observacions, juntament amb la descripció musical de cada atac feta per l'instrumentista que col·laborava en l'assaig, s'han caracteritzat i classificat les diferents formes d'atac.

Pel que fa a l'estudi de l'espontaneïtat, aquest es posposa fins al capítol 6 per quant en ell intervé a més la informació proporcionada per la resposta impulsional.

Els atacs enregistrats també han servit com a comprovació dels resultats teòrics obtinguts per A. Barjau a partir de la simulació matemàtica del funcionament global de la tenora (Barjau 1987).

2.2. EL MUNTATGE EXPERIMENTAL.

El muntatge experimental per a la captació i l'anàlisi dels transitoris d'atac és el que es mostra a la figura 2.2-1. Està constituït pels elements següents:

Micròfon capacitiu de 1/8 de polçada de diàmetre, Brüel & Kjær model 4138 n/s 1152188.

Preamplificador B & K model 2633 n/s 1226560.

Amplificador de mesura B & K model 2607 n/s 391703.

Oscil·loscopi analògic Telequipment model D61a.

Analitzador digital d'espectres B & K model 2032 n/s 1062367.

Microordinador Analog Devices model Macsym-150 n/s 150.

Traçador digital Graphtec model MP-1000 n/s 4040923.

El micròfon es troba inserit transversalment en el tudell, tal com s'observa a la figura 2.2-2, i gràcies a les seves reduïdes dimensions permet realitzar mesures en condicions reals d'execució sense interferir el mecanisme d'autoexcitació. En el cas del tible i la tenora el diàmetre de la secció on es troba el micròfon és suficientment petit com per considerar que la pressió és

uniforme a tota la secció, de manera que la col.locació transversal del micròfon no afecta la mesura de la pressió.

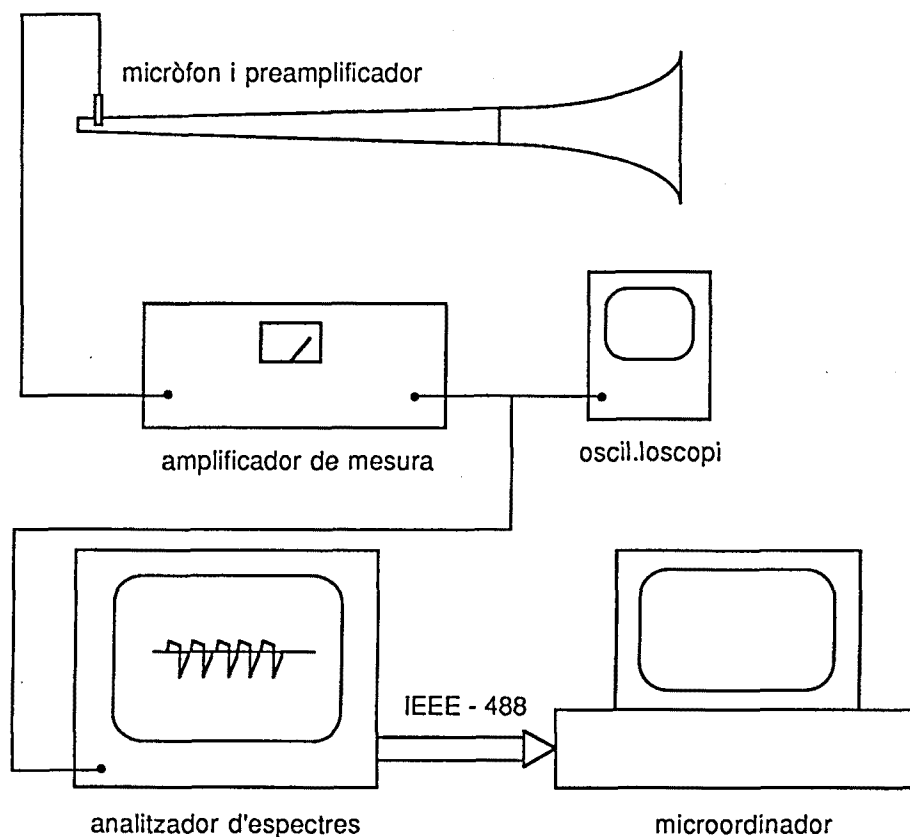


Fig. 2.2-1 Esquema del muntatge experimental per a la captació, enregistrament i anàlisi dels atacs.

La tècnica de mesura és la següent: El senyal captat pel conjunt micròfon més preamplificador és amplificat amb l'amplificador de mesura i tramès a l'analitzador. Aquest treballa en modalitat de convertidor analògic-digital, mostrejant el senyal i emmagatzemant-lo a la seva memòria. Finalment el senyal, ja en forma digital, és enviat per mitjà de l'interfície IEEE-488 al microordinador que realitza les funcions d'anàlisi i visualització de l'atac.

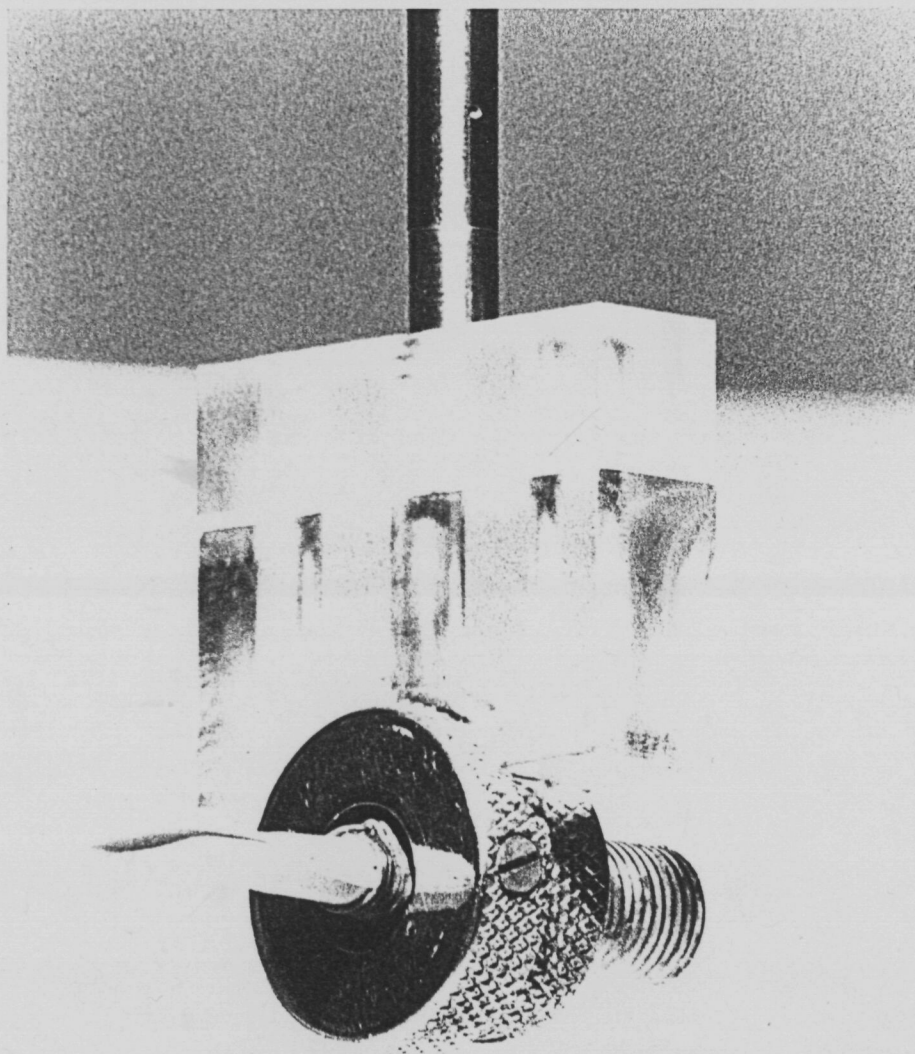


Fig. 2.2-2 Tudell amb un micròfon inserit per a la captació del so intern.

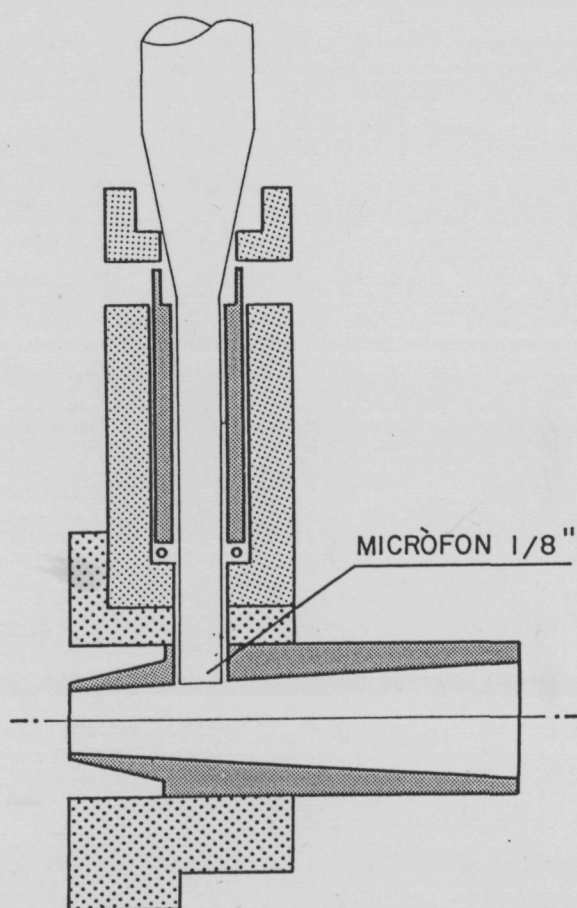


Fig. 2.2-3 Esquema del tudell amb el micròfon inserit.

Com a referència per a la calibració s'ha emprat la pressió sinusoïdal generada per un pistòfon de calibració -B & K model 4220 n/s 390561-, que genera una pressió de 124 dB RMS. Els atacs es presenten en unitats absolutes de pressió -en Pascals- ja que les escales en decibels, correntment emprades per a representar nivells de soroll i densitats espectrals, no són adequades a l'hora de representar mesures instantànies de pressió.

L'analitzador pot treballar fins a una freqüència màxima de mostreig de 65,5 kHz, emmagatzemant 4096 mostres temporals. La màxima resolució

temporal és per tant de 15,3 μ s amb una durada del registre de 62,5 ms. Emprant freqüències de mostreig més baixes s'obtenen registres proporcionalment més llargs, encara que amb menys resolució temporal. La durada dels atacs dels instruments musicals és molt variable, oscil·lant entre 5 i 350 ms. En el cas del tible i la tenora s'ha comprovat que la durada dels atacs és suficientment petita com per a poder ser enregistrats emprant la màxima freqüència de mostreig.

El programa desenvolupat per al tractament i la visualització dels atacs realitza les operacions següents: Llegeix l'atac emmagatzemat digitalment a l'analitzador i el guarda en disc magnètic. Determina l'evolució temporal del contingut espectral de l'atac. I representa gràficament tant el senyal temporal de l'atac com el seu contingut espectral.

L'evolució temporal del contingut espectral es determina subdividint l'atac en segments temporals i retornant aquests un per un a l'analitzador, el qual calcula l'espectre corresponent a cada segment mitjançant un algorisme FFT. El nombre i la durada dels segments s'escolleix en funció de les característiques de l'atac. Pollard i Jansson aconsellen emprar segments de 8,5 ms per a atacs de durada mitjana (Pollard 1982).

Abans del càlcul de cada espectre, el segment es multiplica per una finestra Hanning definida d'acord amb l'expressió (Bendat 1980):

$$B(t) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \quad \text{amb} \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} , \quad (2.2.1)$$

essent T la durada del segment. L'us de la finestra minimitza els errors introduïts en el càlcul de l'espectre pel fet d'emprar un registre de durada finita el qual no té perquè correspondre a un nombre sencer de períodes del senyal que s'analitza.

L'analitzador calcula l'espectre emprant 2048 punts de senyal temporal. Com que en la majoria de casos els segments definits ocupen un nombre inferior de punts, és necessari afegir zeros fins a completar els 2048 punts requerits. Amb aquesta manipulació s'aconsegueix mantenir la mateixa resolució temporal amb que ha estat mostrejat l'atac.

Cada cop que s'obté un espectre, l'analitzador envia el resultat de nou al microordinador que l'emmagatzema en memòria. Finalment, amb tots els espectres obtinguts, el microordinador representa l'evolució del contingut spectral de l'atac en forma de gràfic tridimensional, on els eixos horitzontals corresponen al temps i a la freqüència i l'eix vertical a la magnitud de l'espectre -en valor RMS de pressió-.

2.3. ELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

Els resultats experimentals que es presenten en aquest apartat corresponen als atacs produïts en executar notes aïllades de diferents intensitats -"piano", "forte" i "fortissimo"- i amb diferents tipus d'atacs. Aquestes notes han estat executades per diferents instrumentistes de tible i tenora.

Els tipus d'atac que s'han considerat són els més correntment emprats en aquests instruments. L'atac picat, que s'obté en obturar el pas d'aire amb la llengua i en retirar-la sobtadament per tal de produir un augment brusc del cabal d'entrada, i l'atac bufat que s'obté quan s'inicia la nota sense cap obturació prèvia. Aquest darrer tipus d'atac és el característic de l'execució de notes lligades.

També es presenten els atacs produïts en fer sonar la canya subjectada al tudell però amb aquest desacoblat del tub de l'instrument. Aquesta pràctica, normalment emprada pels músics de tible i tenora, té per finalitat comprovar la qualitat musical de les canyes tant pel que fa a la seva sonoritat com pel que fa a les qualitats necessàries per obtenir una bona espontaneïtat. Es distingeixen dos tipus de sons que es poden produir d'aquesta manera: els "xiulets" i els "rogalls" (Barjau 1986).

Els xiulets són sons afinats i el seu to s'ajusta mitjançant el control de la pressió amb que es prem la canya entre els llavis i del cabal que entra a l'instrument. Aquesta mateixa tècnica és l'emprada a l'hora d'obtenir notes agudes amb l'instrument complet.

Els rogalls són sons d'afinació incerta i s'obtenen en bufar a pressió elevada però deixant força lliure la canya entre els llavis. Aquesta és també la

tècnica emprada en l'execució de les notes greus.

Tant per a les notes com per els rogalls i els xiulets, els atacs es representen en forma d'evolució temporal de la pressió a la secció del micròfon. Per a algunes notes també es representa en forma d'evolució temporal del seu contingut espectral.

Els atacs de la tenora.

En l'estudi dels atacs de la tenora han participat dos instrumentistes: en Jaume Vilà, amb una tenora del constructor Soldevila -També anomenat "Catroi "- i en Frances Alpiste, amb una tenora del constructor Pardo de la Bisbal.

S'han enregistrat els atacs de les notes següents: La nota $Fa_2^\#$, nota que s'obté amb tots els forats tapats i en la qual el pavelló de l'instrument hi té una incidència notable. Les notes Do_3 , $Fa_3^\#$ i Do_4 com a característiques del primer registre. I la nota La_4 com a característica del segon registre.

La figura 2.3-1 mostra l'atac picat de la nota $Fa_2^\#$ executada amb la tenora Soldevila, en les tres intensitats esmentades, i la figura 2.3-2 mostra l'atac picat de la mateixa nota executada amb la tenora Pardo, en aquest cas en intensitats piano i forte.

La semblança entre els resultats d'ambdues tenores és notable. En tots ells s'observa com apareix a cada període una forta depressió tant més accentuada quan més forta és la intensitat amb que s'executa la nota. L'origen de tal depressió es troba en el tancament brusc de la canya causat pel mecanisme d'autoexcitació. Al capítol 6 es presenta una descripció detallada de com es produeix el mecanisme d'autoexcitació basada en part en l'anàlisi dels resultats que es mostren en aquest apartat.

En el atac forte i fortissimo es comprova que l'atac picta és molt ràpid ja que només en dos cicles s'arriba ja al règim estacionari. Aixó és reflex d'una bona espontaneïtat de l'instrument. En els atacs piano no s'ha pogut registrar el transitori per causa de la dificultat que presenta la identificació precisa de l'inici d'aquest tipus d'atac.

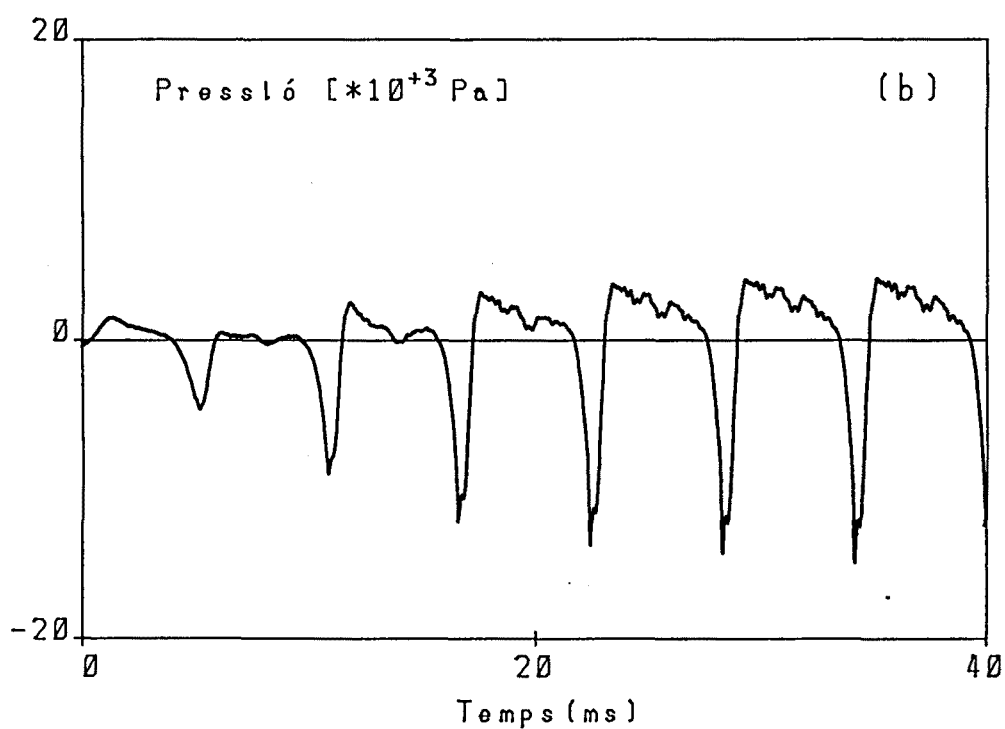
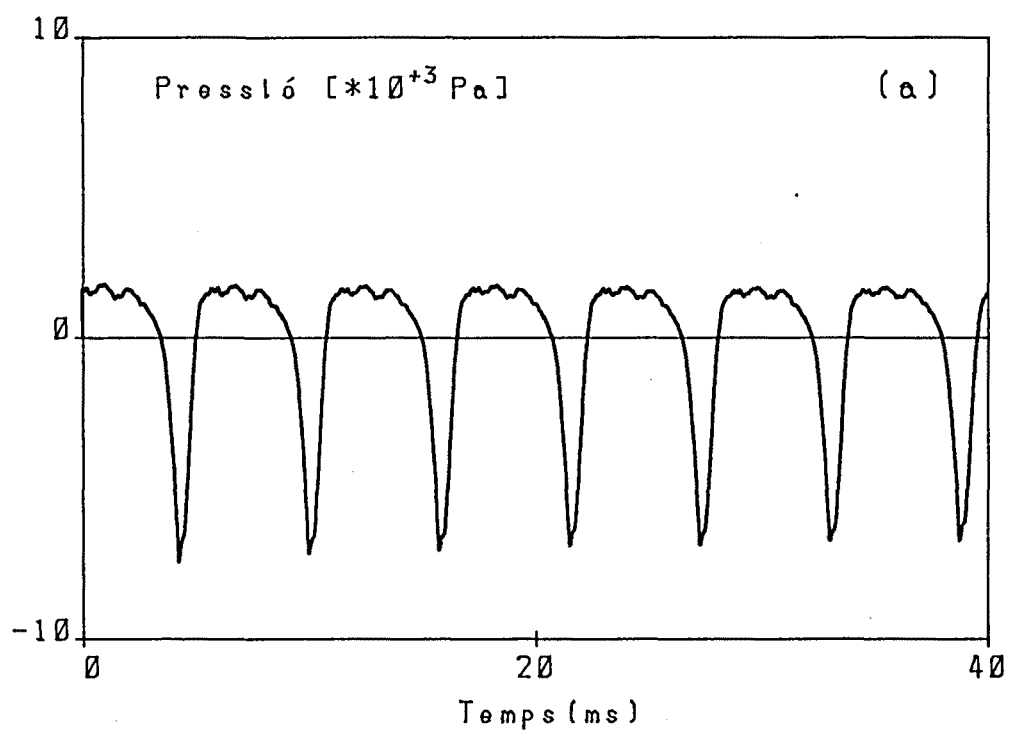


Fig. 2.3-1 Atac picat de la nota $Fa_2^\#$ de la tenora Soldevila.
 (a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

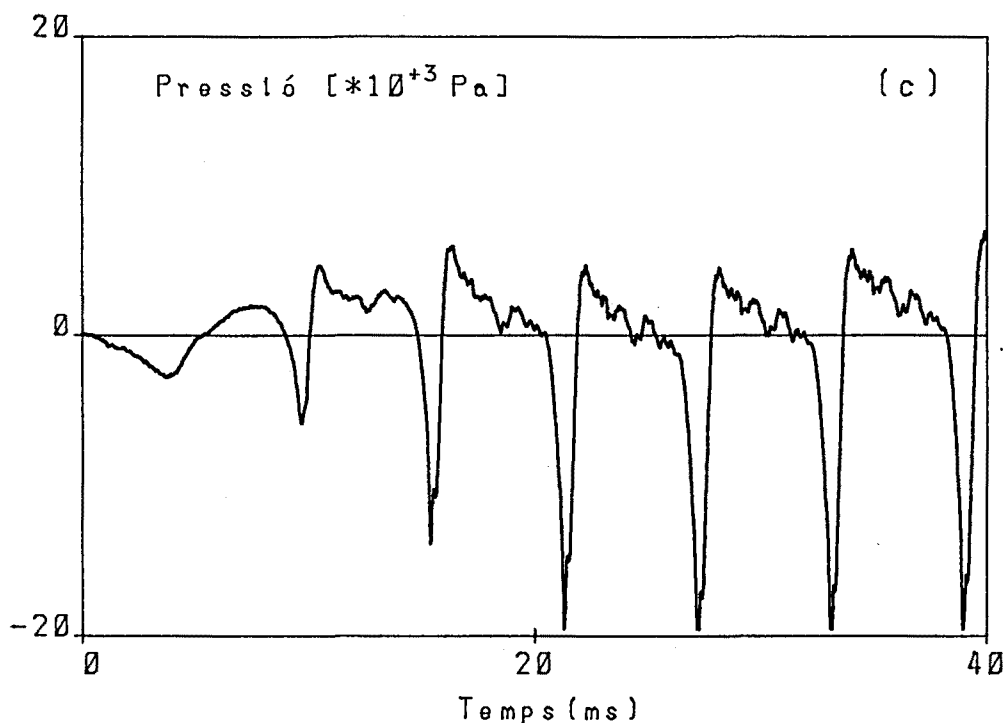


Fig. 2.3-1 cont. (c) Atac picat de la nota $Fa_2^\#$ de la tenora Soldevila, en intensitat "fortissimo".

La figura 2.3-3 correspon als atacs bufat i picat de la nota Do_3 , en intensitat piano, executats amb la tenora Soldevila, i la figura 2.3-4 mostra els atacs picats en intensitats forte i fortissimo per a la mateixa nota i el mateix instrument. Finalment la figura 2.3-5 mostra els atacs picats també de la nota Do_3 , en piano i forte, però executats amb la tenora Pardo.

De nou la semblança entre els resultats d'ambdues tenores és notable, però s'observen diferències en la part del període on la pressió és positiva. Les variacions de pressió que apareixen en aquesta part són degudes a tres causes. Per una banda, la canya, tot just és closa, s'obre per efecte del seu comportament dinàmic i oscil·la de manera que es produeix una fluctuació de pressió a la secció d'entrada. Per altra banda, arriben al tudell reflexions provinents de les discontinuïtats que presenta l'instrument -forats oberts i

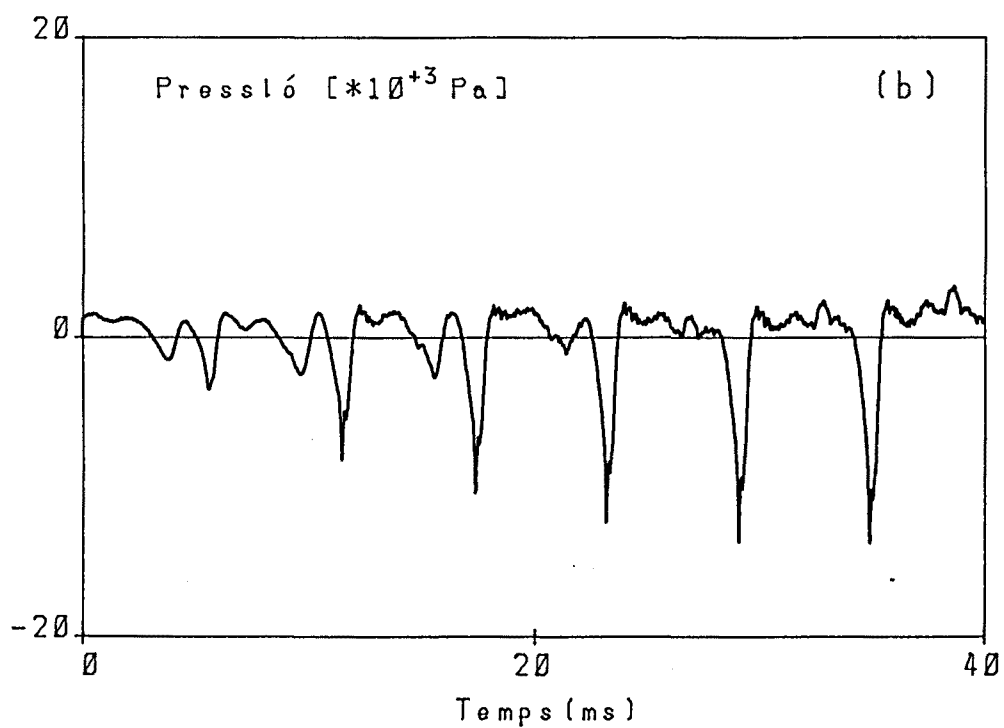
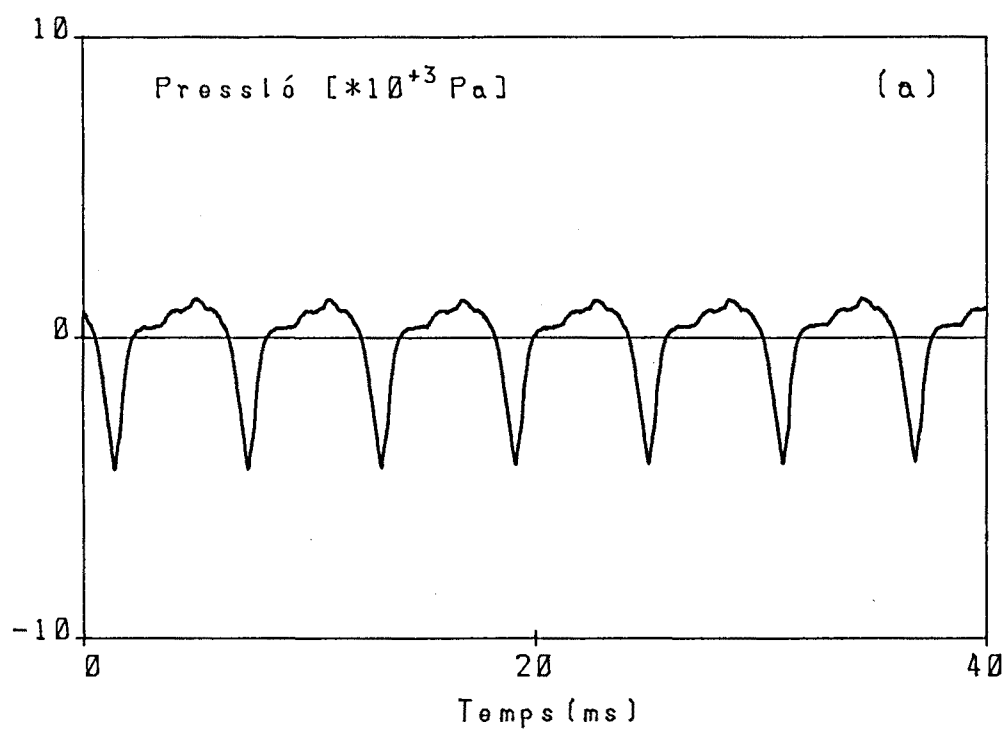


Fig. 2.3-2 Atac picat de la nota $\text{Fa}_2^\#$ de la tenora Pardo.
 (a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

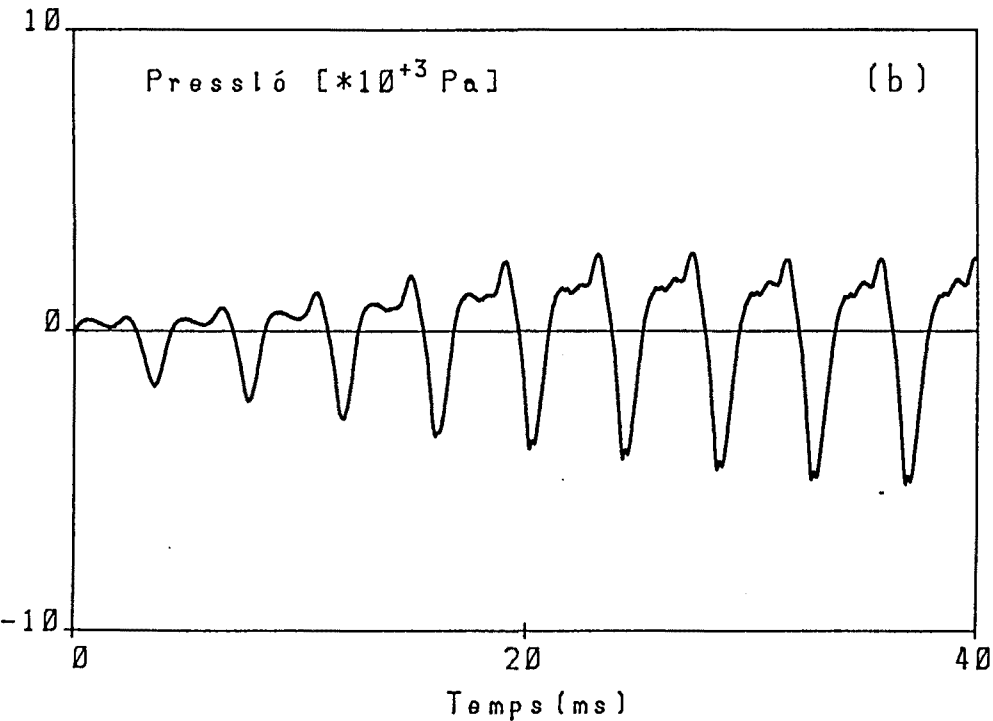
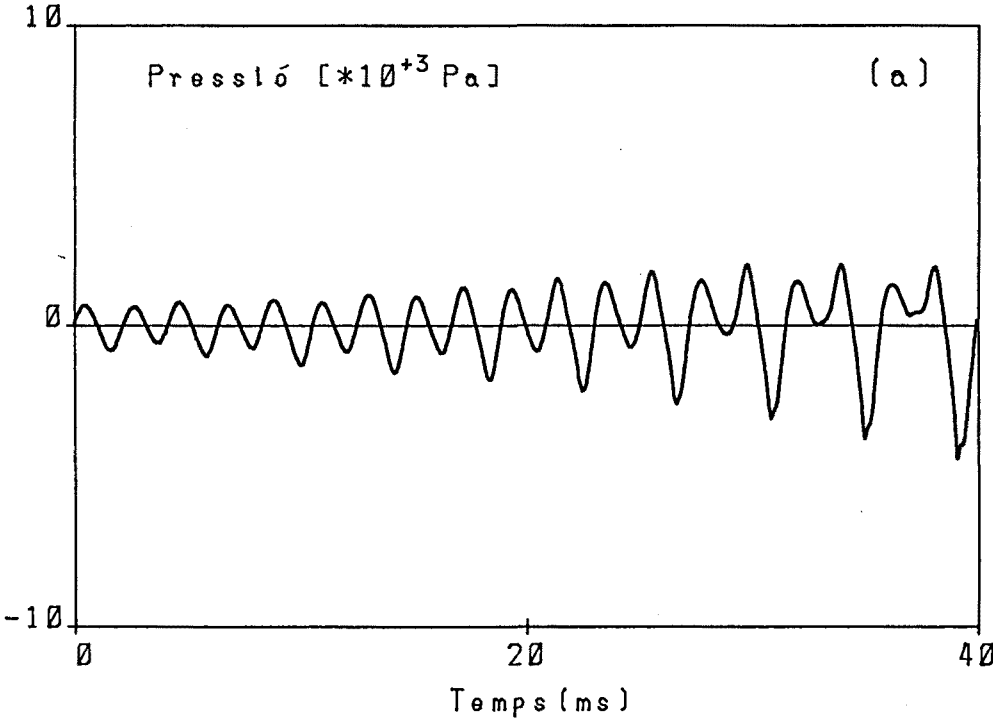


Fig. 2.3-3 Atac "piano" de la nota Do_3 de la tenora Soldevila.
(a) Atac bufat. (b) Atac picat.

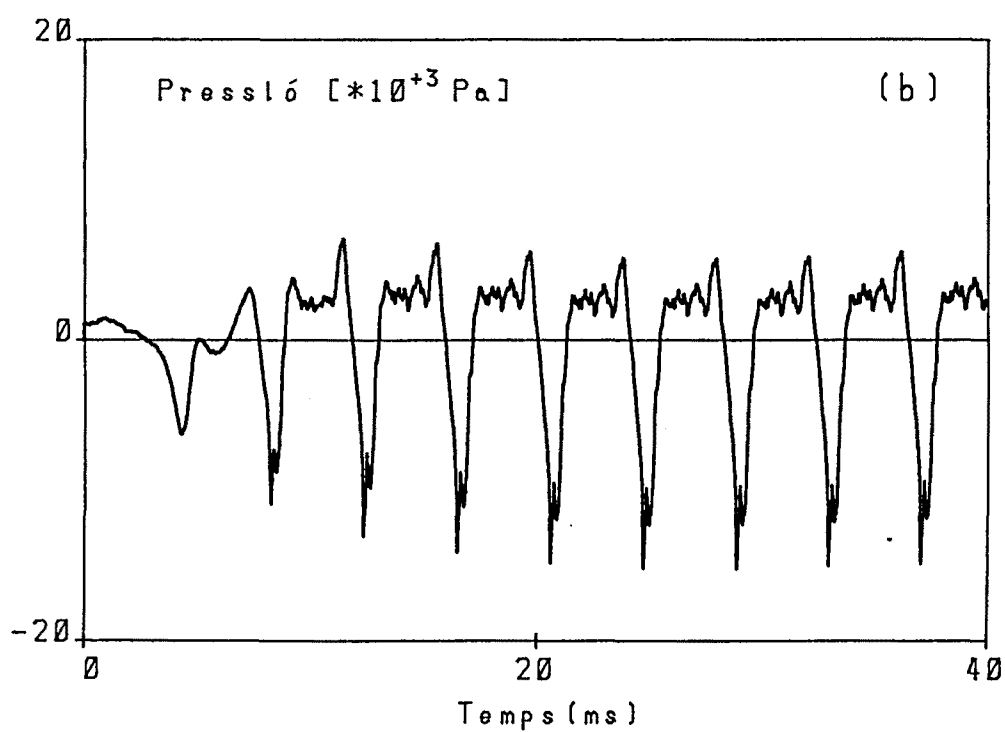
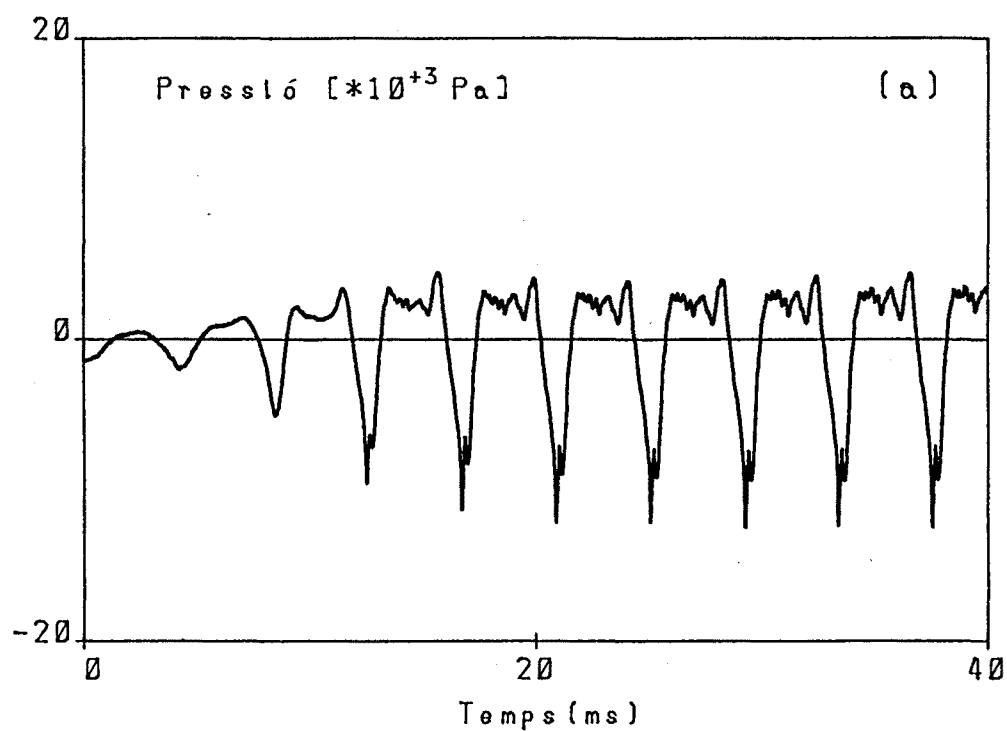


Fig. 2.3-4 Atac picat de la nota Do_3 de la tenora Soldevila.
(a) En intensitat "forte". (b) En intensitat "fortissimo".

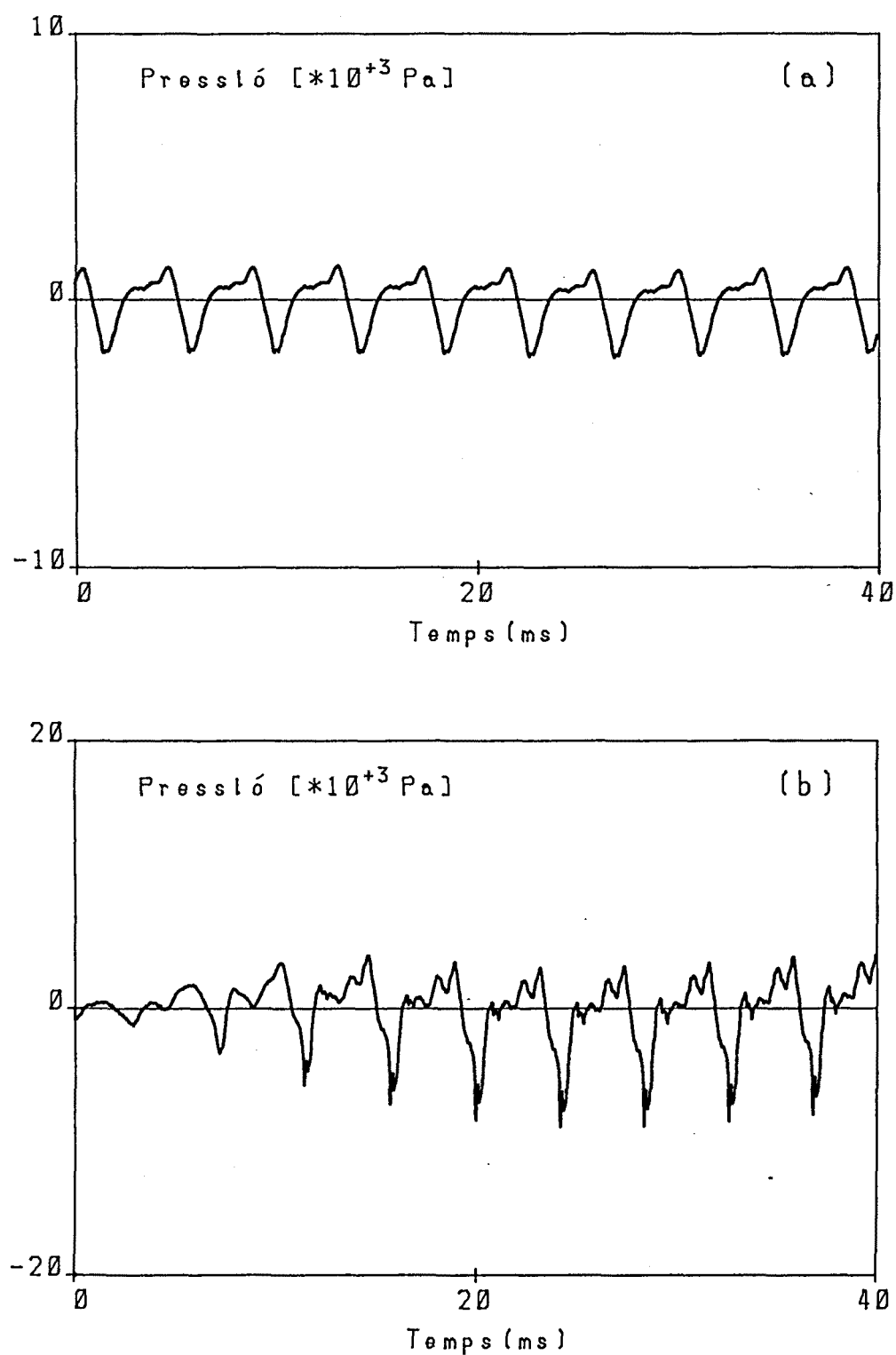


Fig. 2.3-5 Atac picat de la nota Do_3 de la tenora Pardo.
(a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

tancats, canvis de conicitat, l'extrem obert, etc- les quals produeixen també variacions de pressió a la secció d'entrada. I finalment una tercera causa és la dinàmica del tracte laringeo-bucal de l'instrumentista, en el qual es generen també fluctuacions de pressió causades per la interrupció del cabal d'entrada en tancar-se i obrir-se la canya. El fet que els dos instruments presentin diferències, tant pel que fa a la seva geometria com pel que fa a la canya emprada, i que els atacs de cada instrument hagin estat executats per diferents instrumentistes, justifica les diferències observades.

En els atacs picats forte i fortissimo es constata altre cop la rapidesa amb que s'estableix el règim estacionari, però en el cas dels atacs piano -figura 2.3-3- es presenta un transitori més llarg que en l'atac bufat arriba a ser superior als 50 ms. Aquest fet està relacionat amb la manera amb que s'estableix el mecanisme d'autoexcitació. En l'atac bufat també s'observa com el transitori s'inicia amb una fluctuació de periodicitat doble a la de la nota, atribuïble al moviment de la canya quan encara no s'ha establert de forma definitiva el mecanisme d'autoexcitació. Aquest fet però no és una característica pròpia d'aquest tipus d'atac.

Les figures 2.3-6, 2.3-7 i 2.3-8 corresponen respectivament als atacs picats de les notes $Fa_3^\#$, Do_4 i La_4 , executats amb la tenora Soldevila, en les tres intensitats piano, forte i fortissimo. Per a totes les notes s'observa com a mesura que augmenta la intensitat, la depressió que es produeix a cada període és més intensa. Aixó és reflex d'un tancament de la canya més sobtat. També s'observa com apareixen fluctuacions de pressió positiva més elevades ja que, en bufar més fort l'instrumentista, la fluctuació de pressió causada per la interrupció del cabal d'entrada en obrir i tancar la canya és més intensa.

Si es comparen els atacs d'igual intensitat de les diferents notes, es comprova com per a les notes més agudes l'augment de pressió que es produeix tot just la canya comença a obrir-se és més ràpid que per a les notes greus. Aixó es deu a la tècnica emprada en l'execució de les notes agudes, anàloga a l'emprada en l'execució dels xiulets. A mesura que s'executen notes més agudes, la canya es prem més fort entre els llavis la qual cosa fa augmentar la rigidesa del conjunt canya-llavis i com a conseqüència la seva resposta és més ràpida.

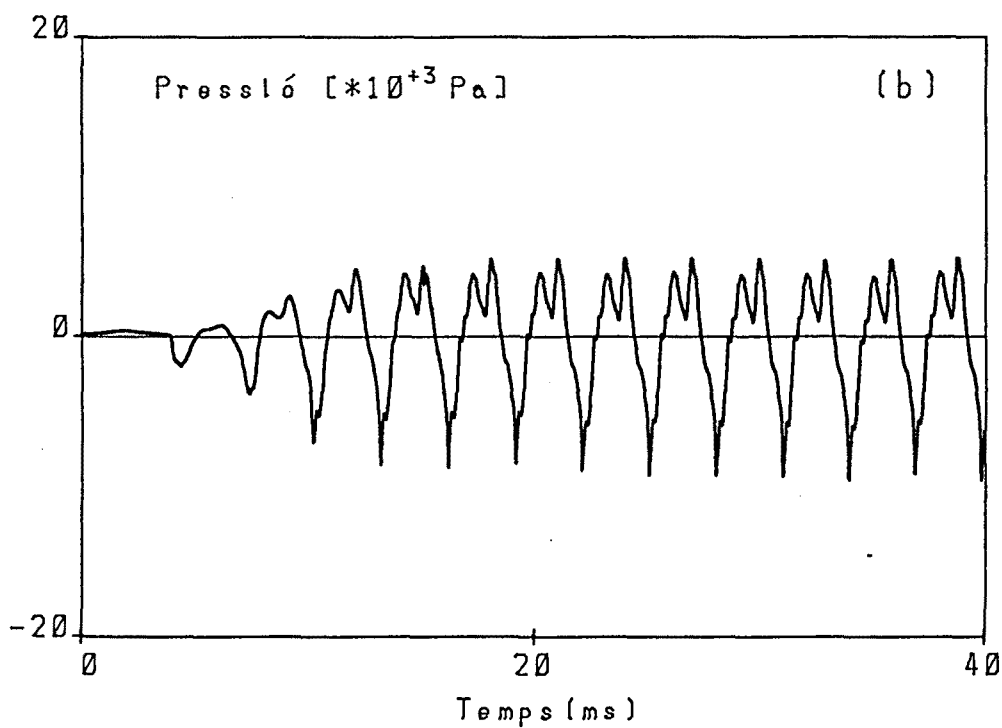
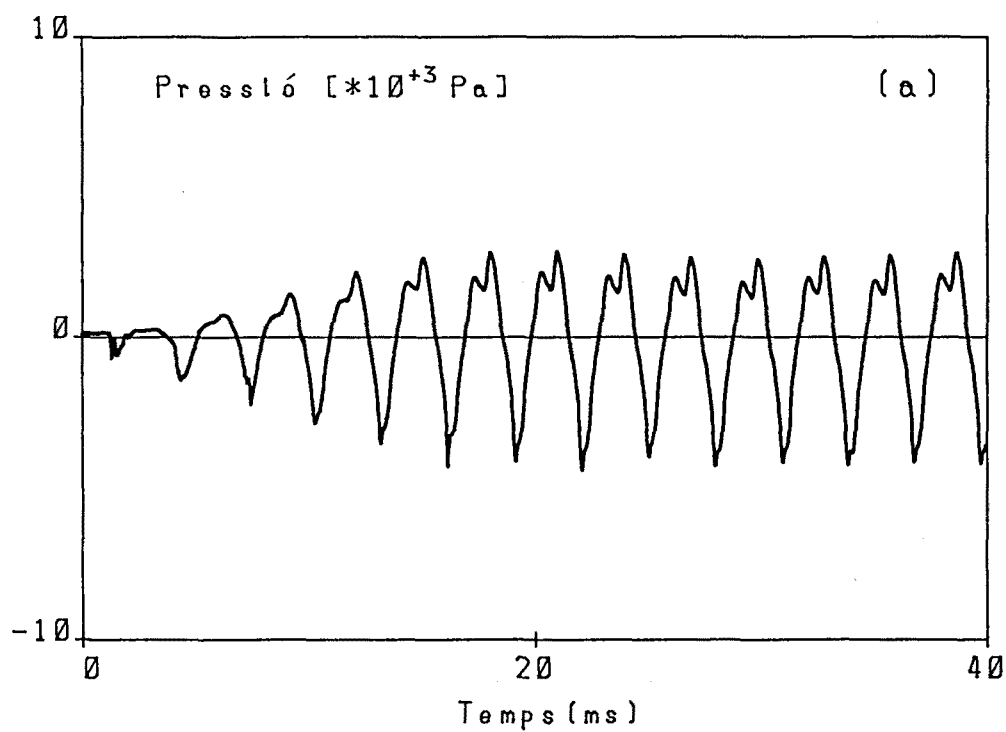


Fig. 2.3-6 Atac picat de la nota $Fa_3^\#$ de la tenora Soldevila.
(a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

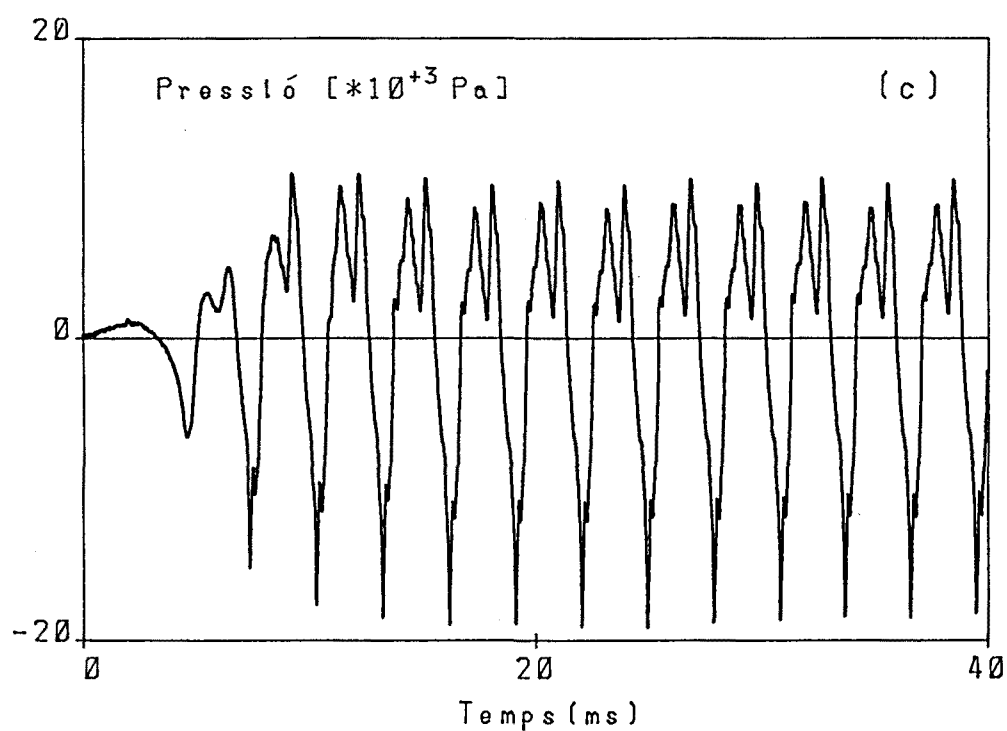


Fig. 2.3-6 cont. (c) Atac picat de la nota $Fa_3^\#$ de la tenora Soldevila, en intensitat "fortissimo".

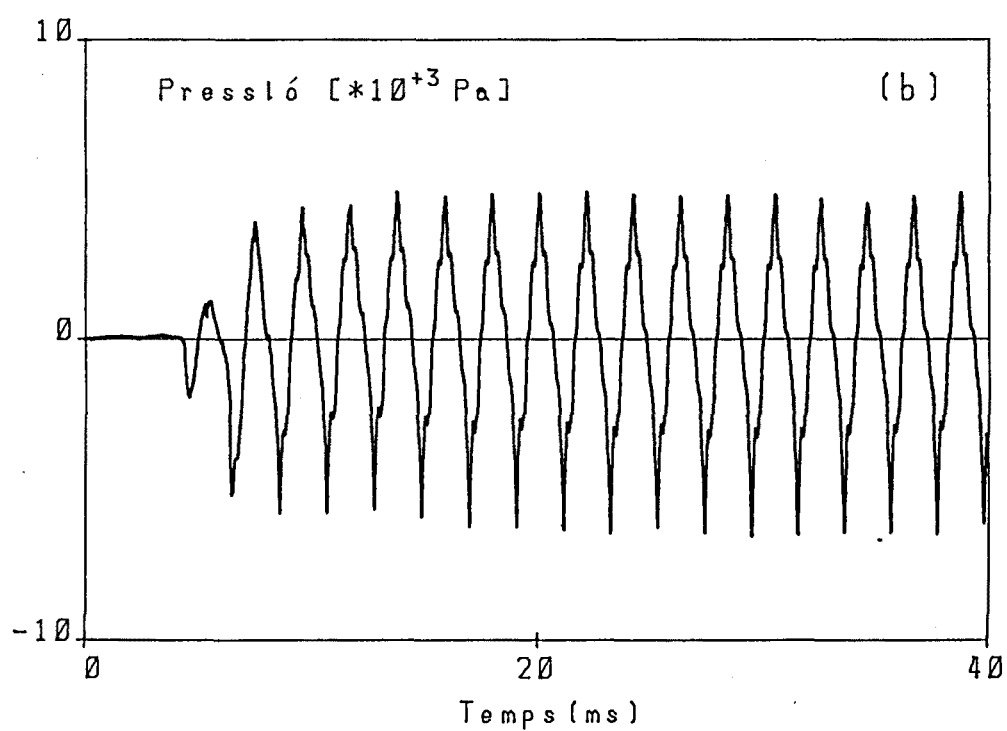
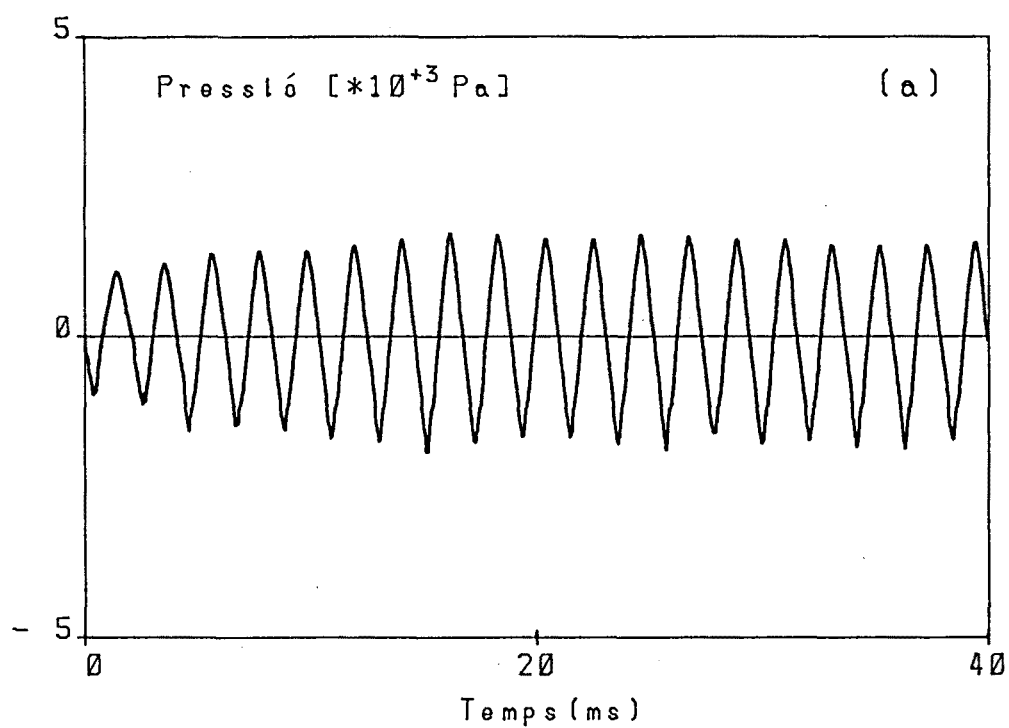


Fig. 2.3-7 Atac picat de la nota Do_4 de la tenora Soldevila.
 (a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

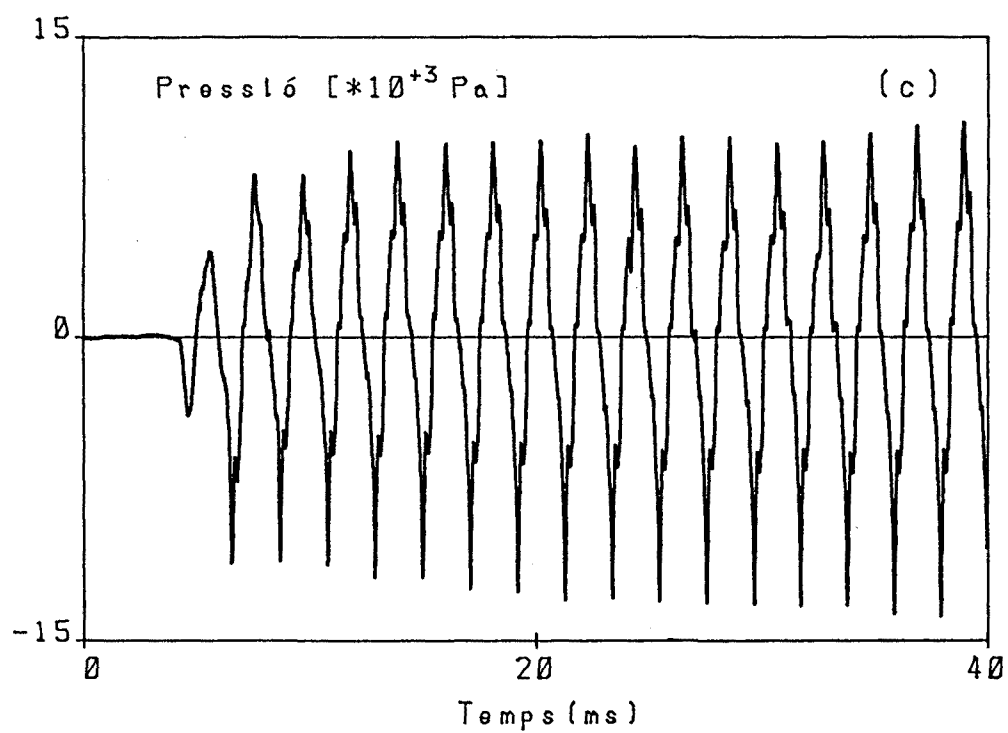


Fig. 2.3-7 cont. (c) Atac picat de la nota Do_4 de la tenora Soldevila, en intensitat "fortissimo".

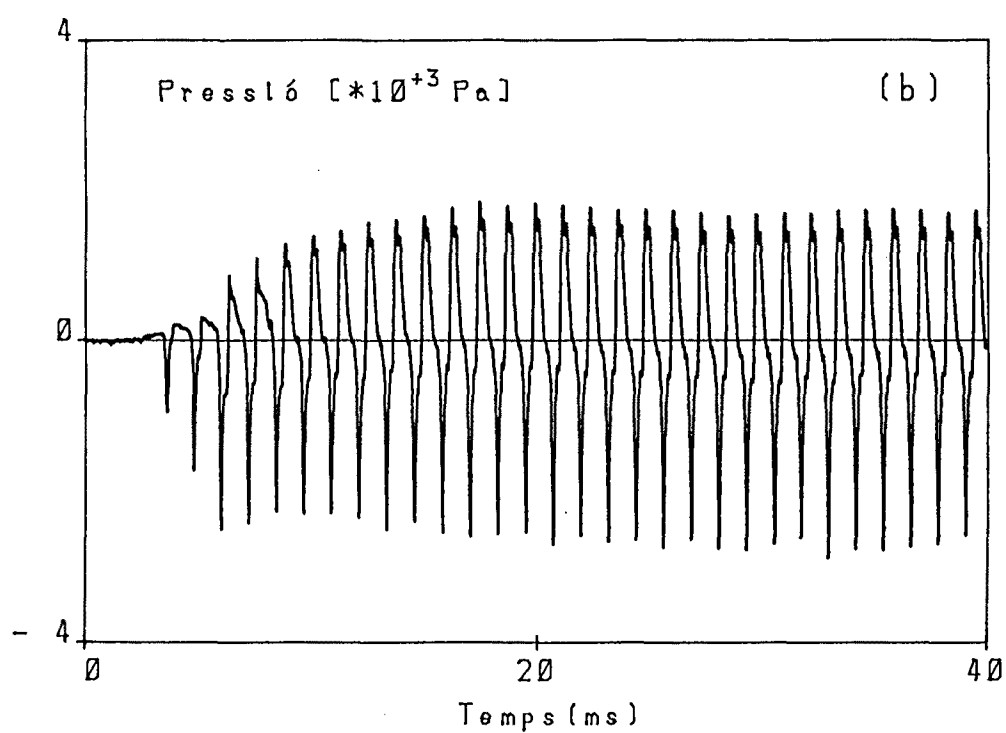
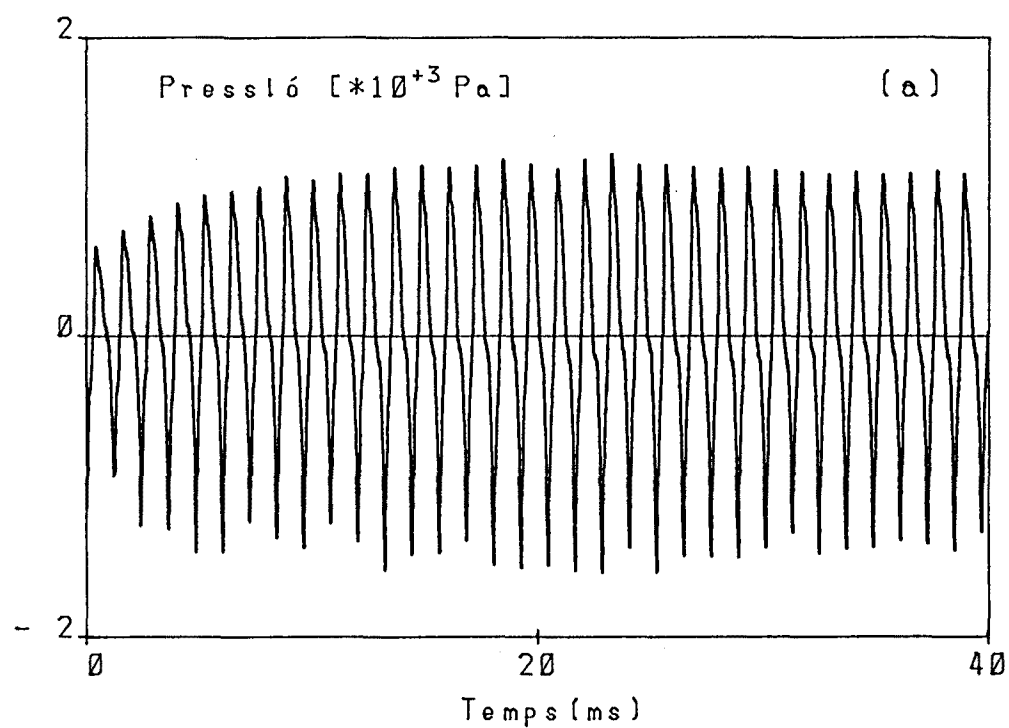


Fig. 2.3-8 Atac picat de la nota La_4 de la tenora Soldevila.
(a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

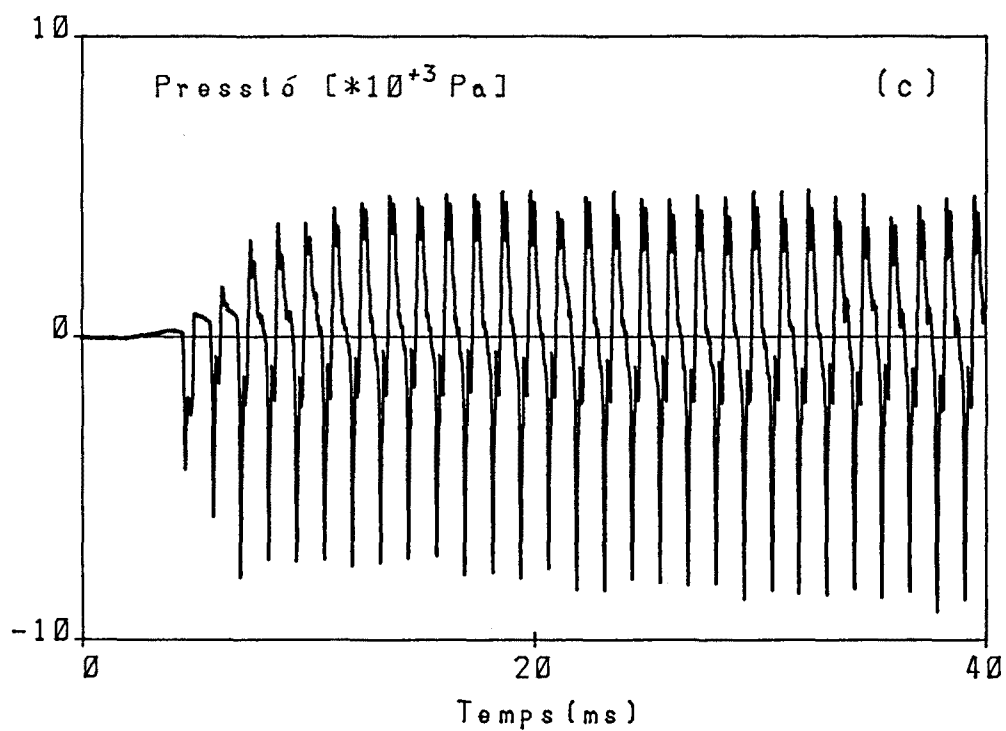


Fig. 2.3-8 cont. (c) Atac picat de la nota La_4 de la tenora Soldevila, en intensitat "fortissimo".

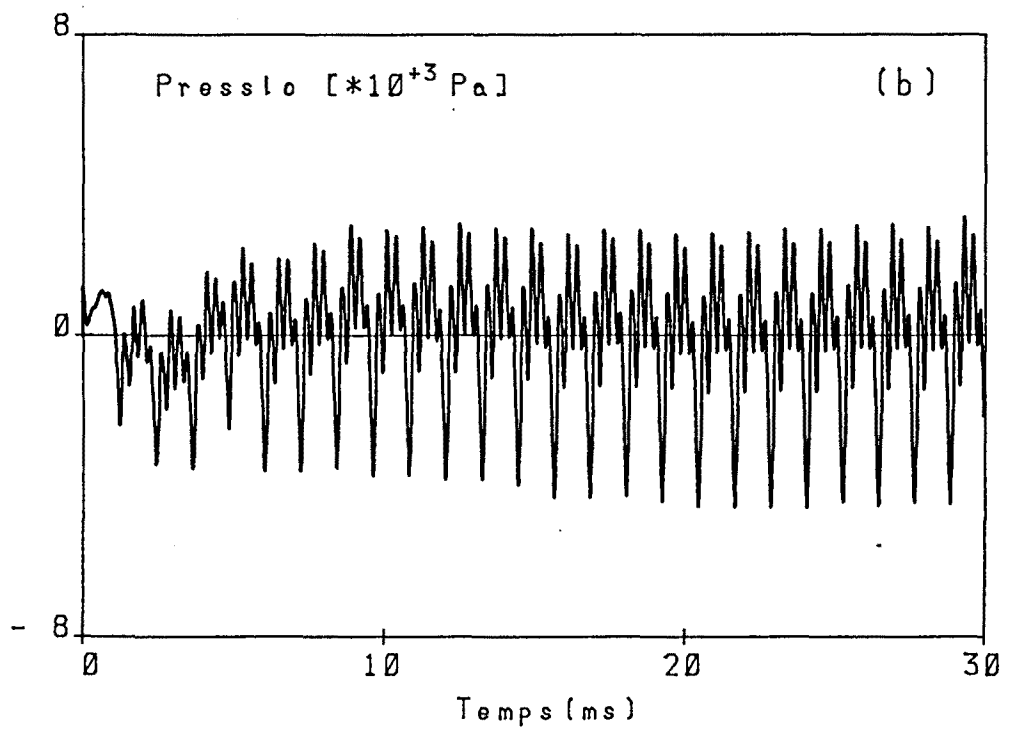
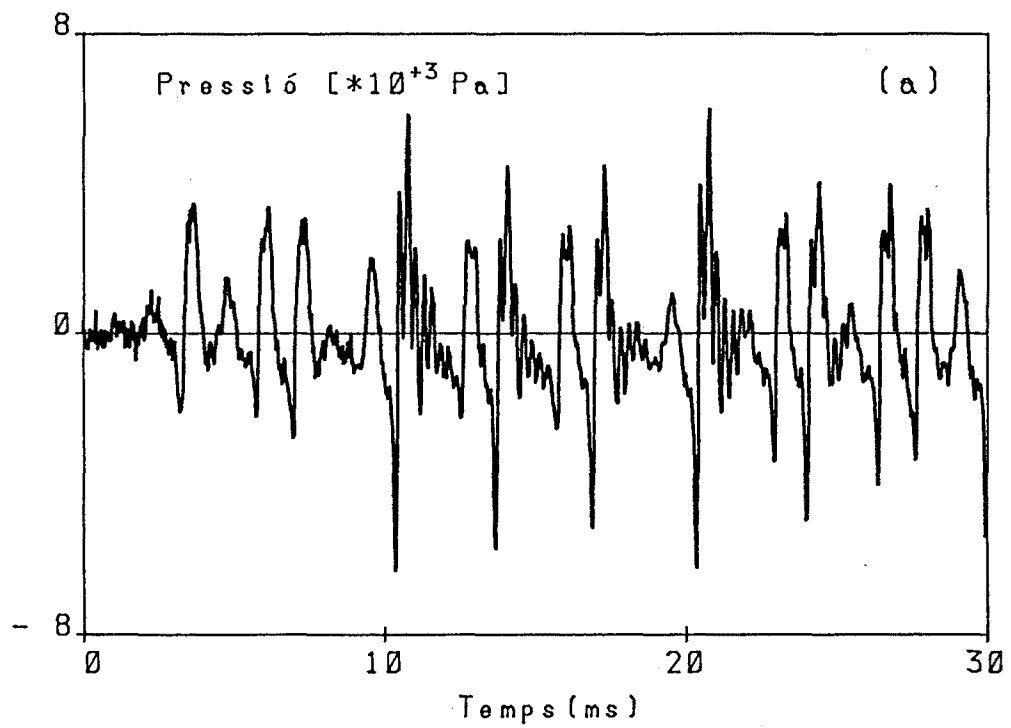


Fig. 2.3-9 Rogall (a) i xiulet (b) d'una canya de tenora.

La figura 2.3-9 mostra els atacs corresponents a un rogall i un xiulet executats amb una canya de tenora. S'observa com en el xiulet es produeix un tancament de la canya a cada cicle d'oscil·lació, mentre en el rogall el tancament es produeix cada dos o tres cicles, fluctuant de manera erràtica entre aquests dos nombres per causa del poc control que els llavis exerceixen al damunt de la canya. Es per aquesta raó que la seva forma d'ona no és periòdica i que el seu so no presenta per tant una afinació definida.

Per finalitzar, la presentació dels atacs de la tenora es completa amb la representació gràfica de l'evolució temporal del contingut espectral de l'atac per a diferents notes. L'evolució temporal s'ha obtingut subdividint el registre de l'atac en 13 segments de 15 ms de durada, decalats entre ells 4 ms. La durada dels segments s'ha escollit de manera que cada un d'ells contingui com a mínim tres períodes de la nota. D'aquesta manera l'espectre obtingut mostra correctament la periodicitat del senyal.

Les figures 2.3-10, 2.3-11 i 2.3-12 corresponen a l'evolució temporal del contingut espectral de la nota Do_3 en executar els atacs piano-bufat, piano-picat i forte-picat respectivament -mostrats a les figures 2.3-3 i 2.3-4-. S'observa com a l'inici de l'atac piano-bufat predomina el segon harmònic i paulatinament va apareixent el primer, fins que a la fi és aquest darrer el que predomina. Aquest resultat concorda amb el que es va observar en el registre temporal -figura 2.3-3-. L'atac comença amb una oscil·lació de la canya, de freqüència doble a la de la nota, prèvia a l'establiment del règim permanent. En canvi els atacs picats presenten ja d'entrada un predomini del primer harmònic, i assoleixen més ràpidament el règim estacionari.

Entre l'atac forte-picat i l'atac piano-picat, a part d'una diferència en intensitat, hi ha una diferència en contingut espectral. L'atac forte-picat presenta més harmònics d'alta freqüència que l'atac piano-picat degut al tancament més brusc que sofreix la canya i a les fluctuacions de pressió més elevades que presenta el primer.

Les figures 2.3-13 i 2.3-14 corresponen a l'evolució temporal del contingut espectral de la nota $Fa_3^\#$ en executar els atacs piano-picat i forte-picat -mostrats a la figura 2.3-6-. Els resultats obtinguts són anàlegs als obtinguts per a la nota Do_3 , exceptuant el fet que el segon harmònic és menys intens.

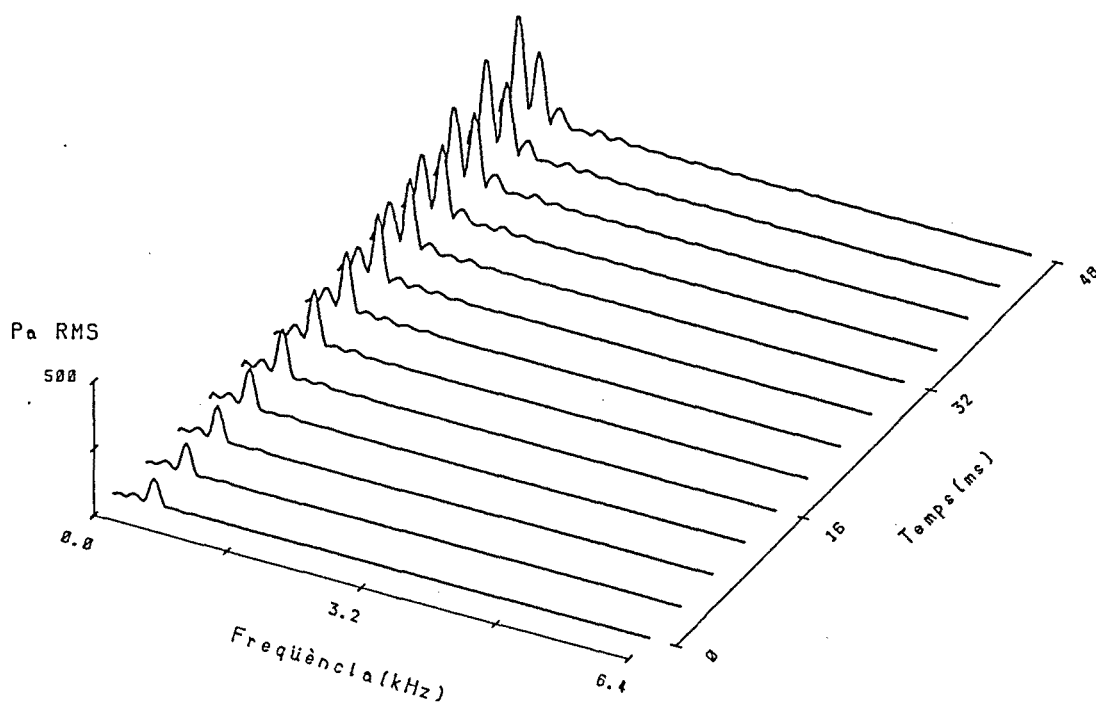


Fig. 2.3-10 Evolució temporal del contingut espectral de la nota Do_3 en executar un atac "piano" bufat. Tenora Soldevila.

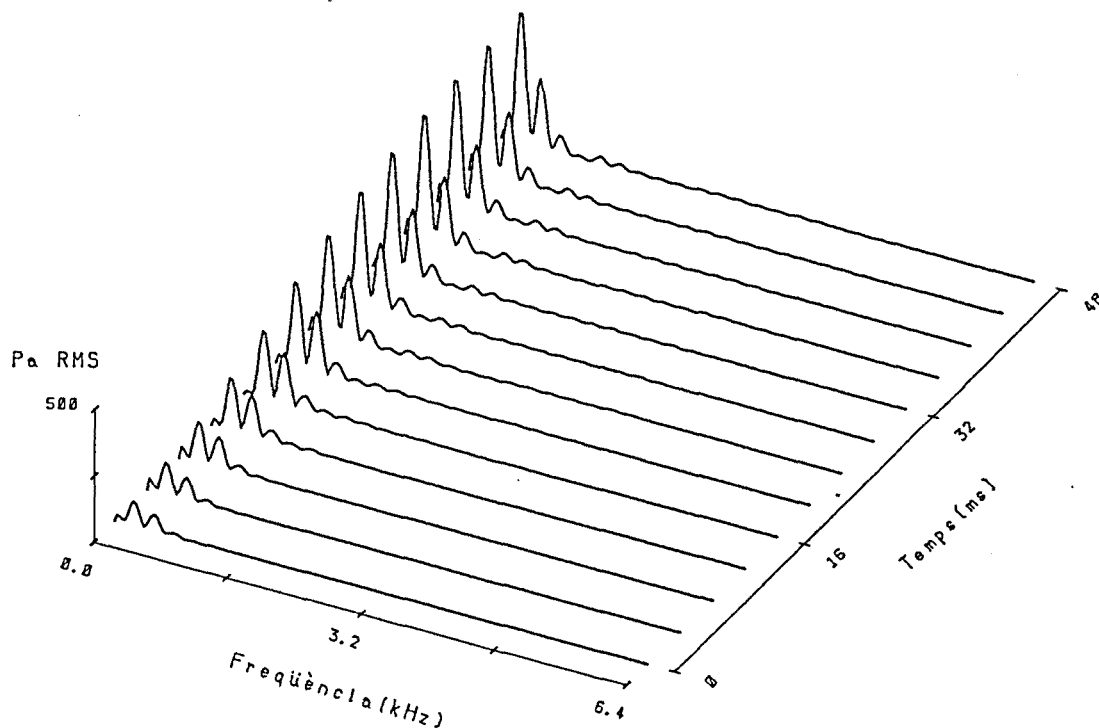


Fig. 2.3-11 Evolució temporal del contingut espectral de la nota Do_3 en executar un atac "piano" picat. Tenora Soldevila.

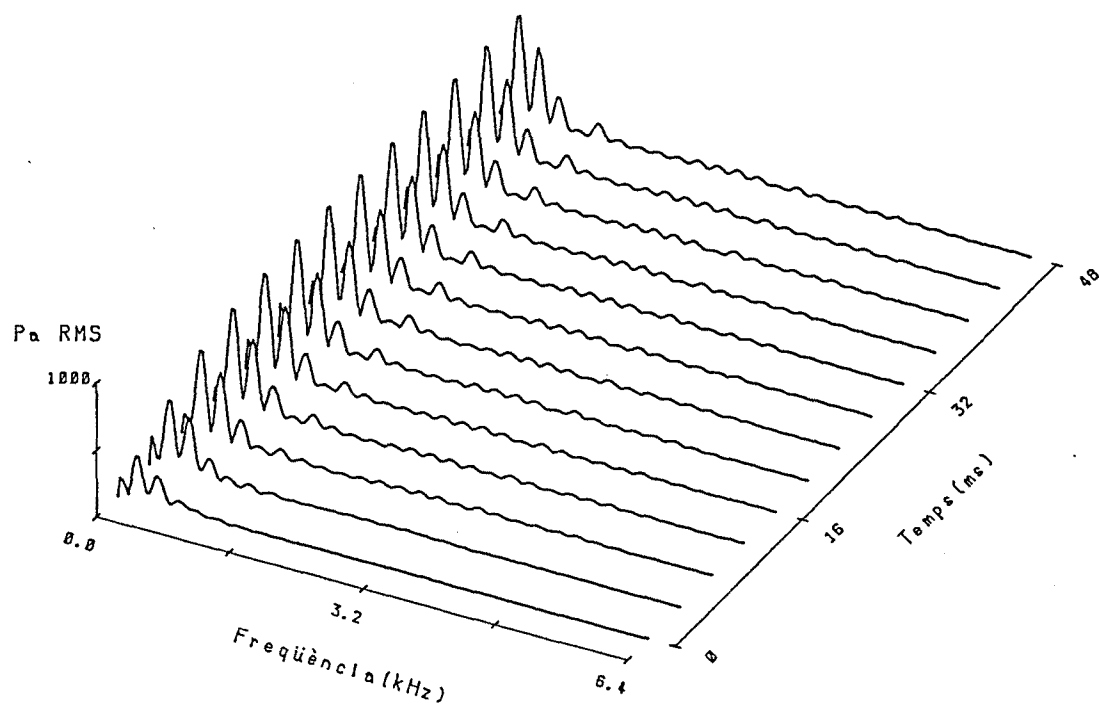


Fig. 2.3-12 Evolució temporal del contingut espectral de la nota Do₃ en executar un atac "forte" picat. Tenora Soldevila.

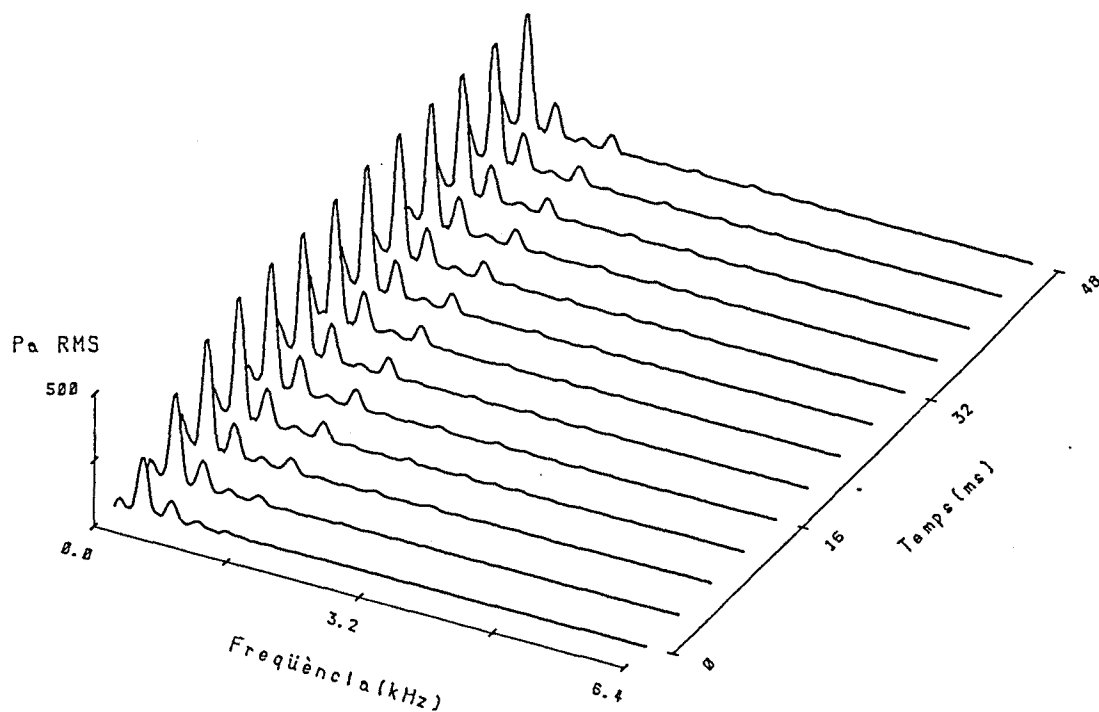


Fig. 2.3-13 Evolució temporal del contingut espectral de la nota Fa₃[#] en executar un atac "piano" picat. Tenora Soldevila.

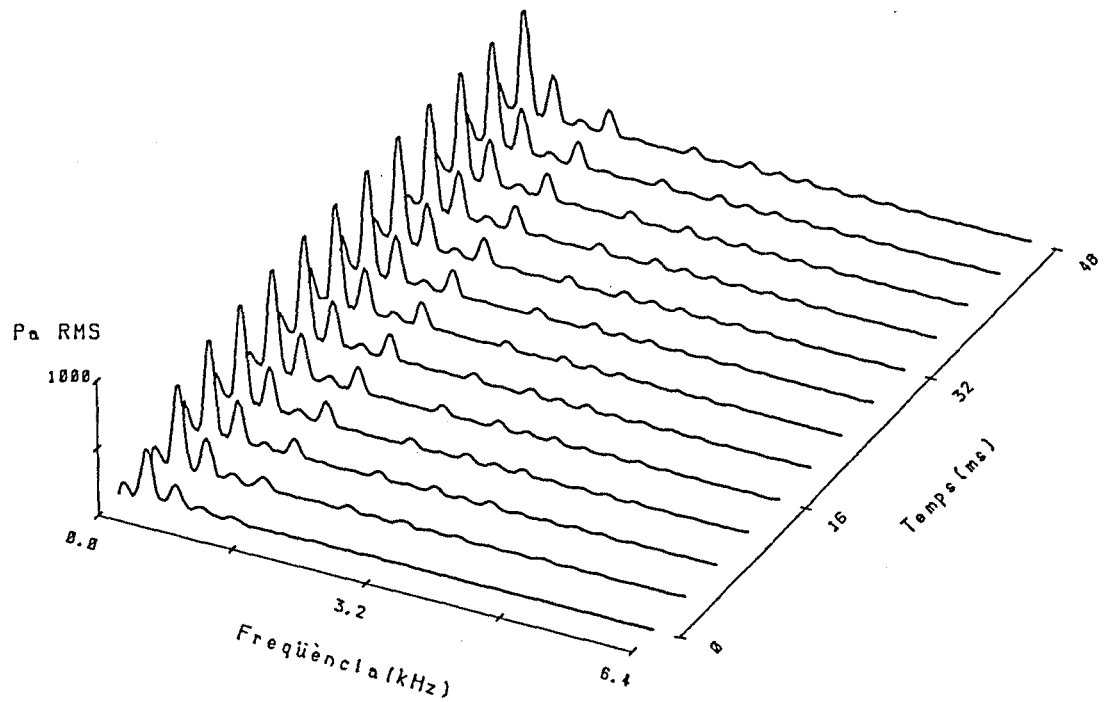


Fig. 2.3-14 Evolució temporal del contingut espectral de la nota $Fa_3^\#$ en executar un atac "forte" picat. Tenora Soldevila.

En tots els atacs picats que s'han mostrat, la rapidesa amb que s'estableix el règim estacionari fa que els successius espectres obtinguts siguin pràcticament iguals. L'anàlisi de l'evolució temporal del contingut espectral dona per tant poca informació sobre el transitori de l'ona interna. Diferents autors però han emprat amb èxit aquesta tècnica per a l'anàlisi de l'ona radiada per diferents instruments amb la finalitat d'estudiar el paper de l'atac en la percepció psicoacústica dels sons musicals (Pollard 1982). I també s'ha emprat per analitzar l'evolució del contingut espectral d'una nota a mida que es fa variar progressivament la seva intensitat (Cardona 1980). Aquests aspectes no s'han abordat en aquest treball.

Els atacs del tible.

En l'estudi dels atacs del tible han intervingut dos instrumentistes: En Josep Macià i en Francesc Benítez, ambdós amb tibles del constructor Pardo de la Bisbal. S'han enregistrat atacs picats per a diferents notes. Els atacs piano i forte han estat executats per en J. Macià i els atacs fortissimo per en F. Benitez.

Els resultats que es presenten corresponen a les següents notes: Les notes La_2 , Mi_3 i Sol_3 del primer registre -figures de la 2.3-15 a la 2.3-17 respectivament- essent la nota La_2 la més greu de la tessitura de l'instrument. I les notes Re_4 primera del segon registre, i Sol_4 també del segon registre -figures 2.3-18 i 2.3-19 respectivament-. En tots els casos s'han enregistrat els atacs en les tres intensitats esmentades.

Els resultats obtinguts són anàlegs als obtinguts per a la tenora. S'observa també a cada cicle la presència de la depressió causada pel tancament de la canya, i unes fluctuacions de pressió positiva tant més fortes quan més elevada és la intensitat de la nota. En els atacs piano, especialment en els que corresponen a les notes més agudes, la forma d'ona tendeix a ser sinusoïdal i no s'observa una depressió gaire important. Hi han dues causes que expliquen aquest resultat: En primer lloc, el mecanisme d'autoexcitació és poc intens i possiblement la canya no clou totalment, presentant-se així una depressió suau. I en segon lloc, en ser la tessitura del tible més alta que la de la tenora, el contingut espectral de l'ona interna és més pobre en harmònics d'alta freqüència ja que la freqüència del fonamental de la nota és més propera a la freqüència de tall de l'instrument. Per aquesta raó la forma de l'ona interna dels atacs piano és més suau que en el cas dels atacs piano de la tenora.

També s'observa com el transitori inicial dels atacs piano és molt gradual i s'exten durant un temps que varia entre 10 i 15 ms. Aquests atacs, per les seves característiques, s'haurien de considerar més com atacs bufats que no pas picats.

La figura 2.3-20 mostra els atacs corresponents a un rogall i un xiulet executats amb la canya d'un tible. En el rogall s'observa que es produeix un tancament de la canya cada dos cicles d'oscil·lació mentre en el xiulet es

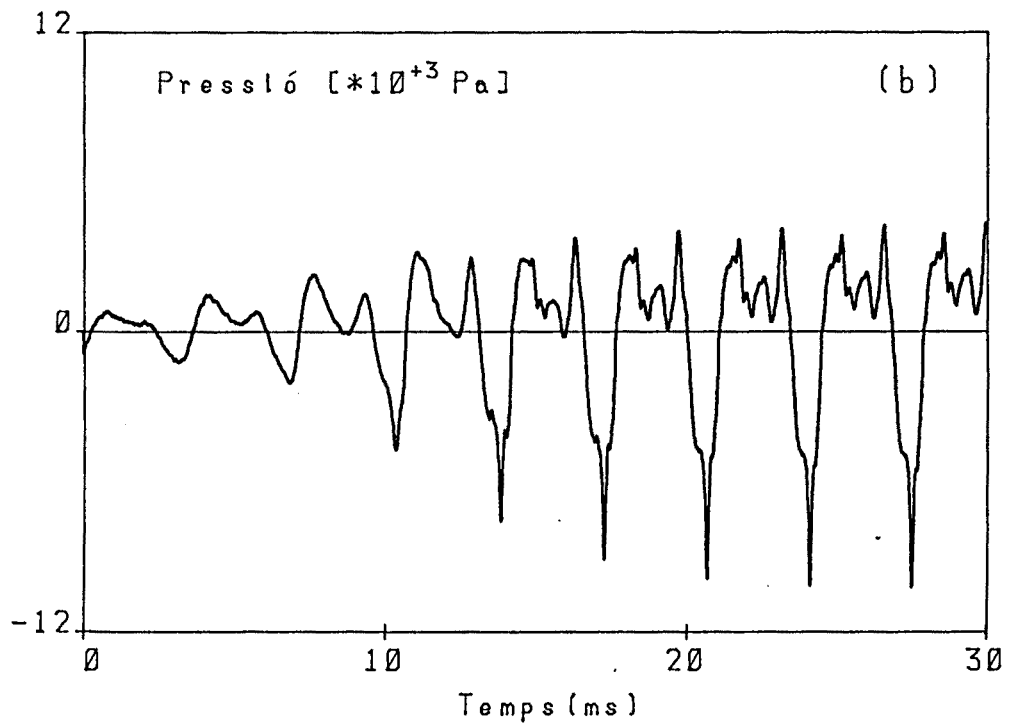
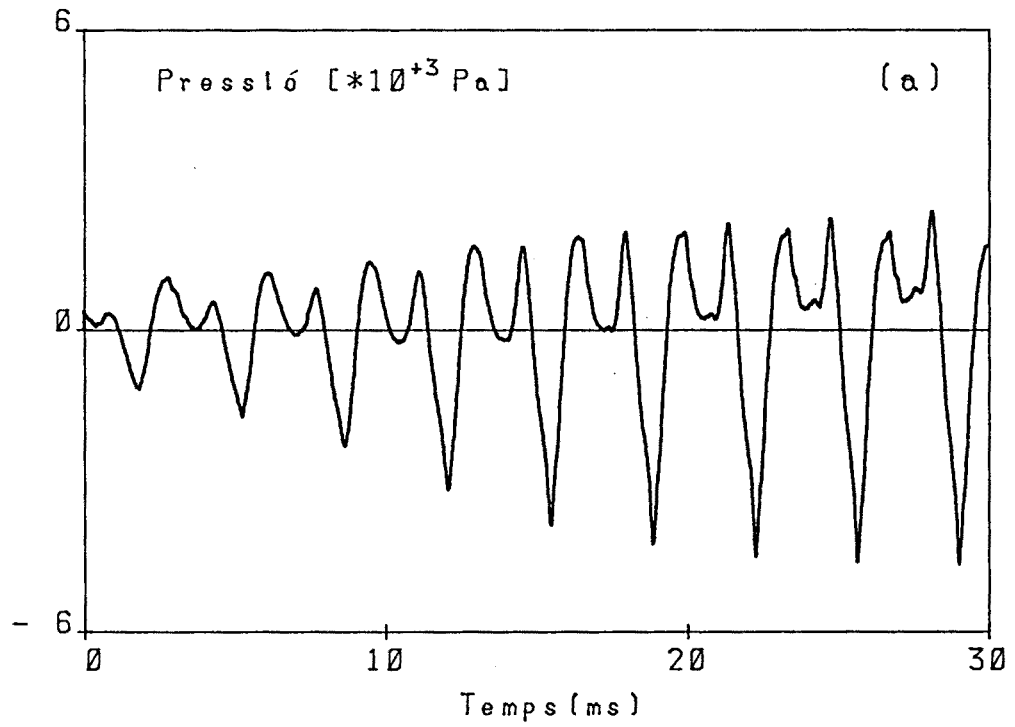


Fig. 2.3-15 Atac picat de la nota La_2 del tible.
 (a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

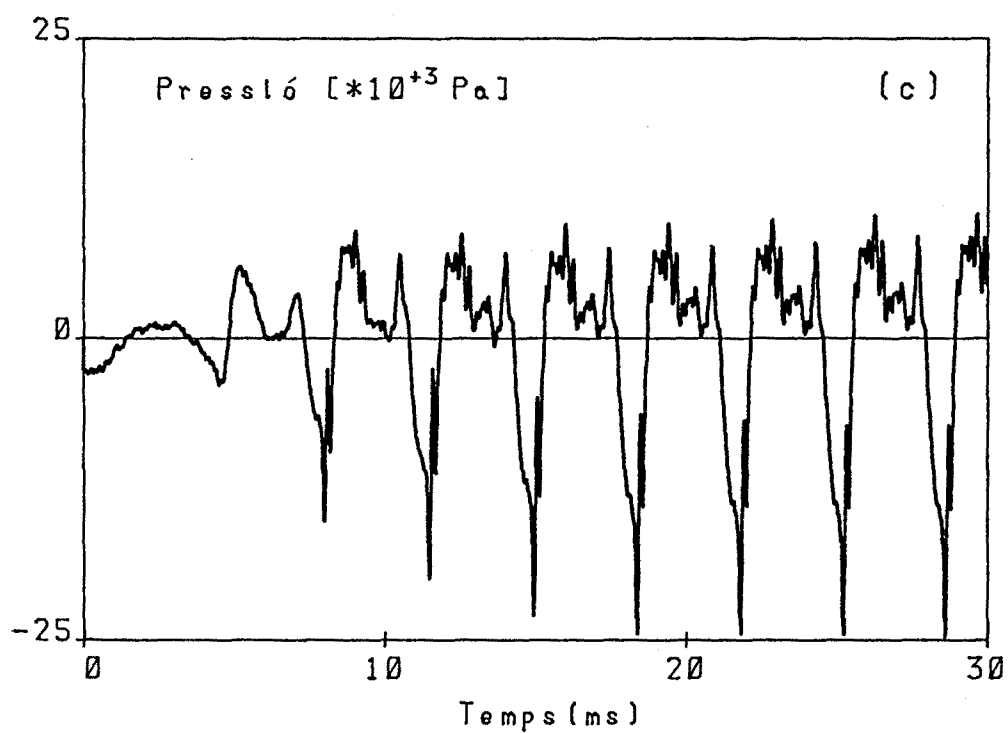


Fig. 2.3-15 cont. (c) Atac picat de la nota La_2 del tible, en intensitat "fortissimo".

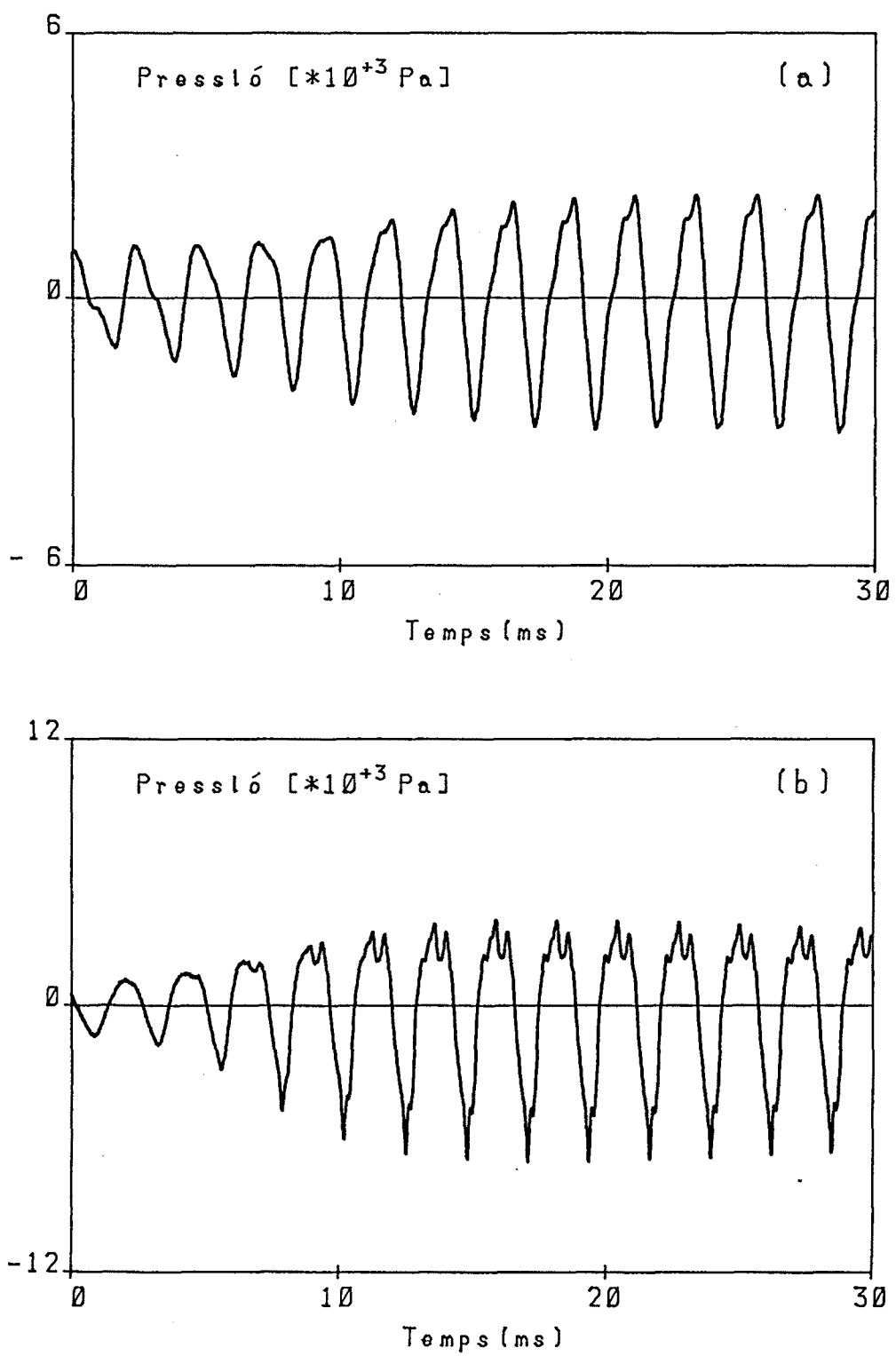


Fig. 2.3-16 Atac picat de la nota Mi_3 del tible.
(a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

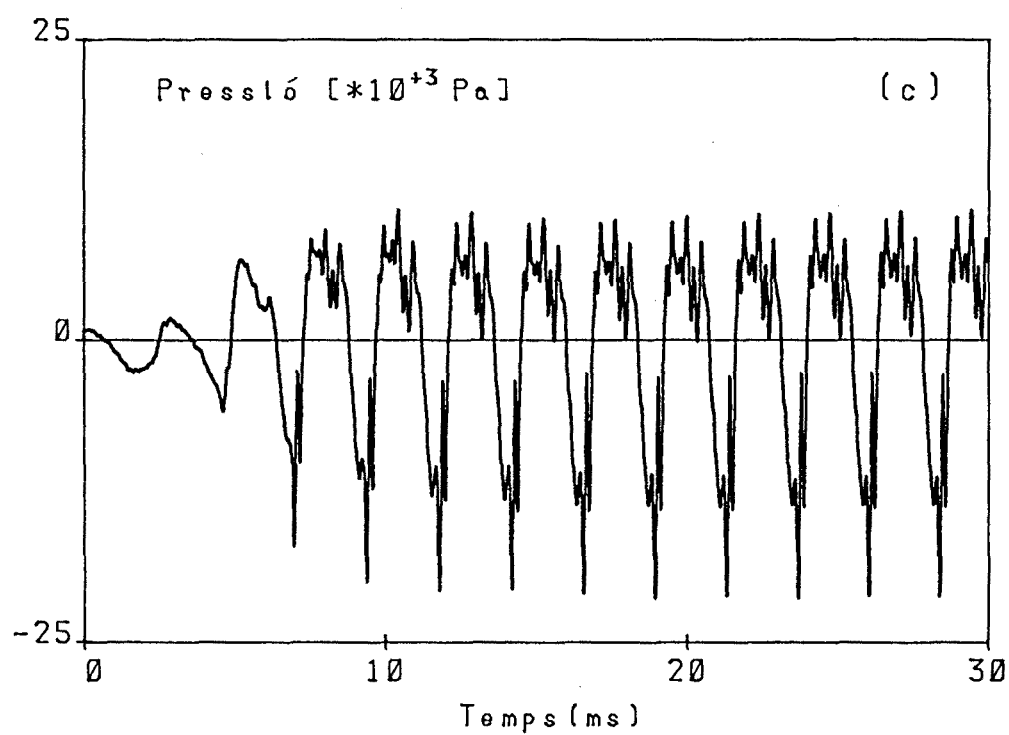


Fig. 2.3-16 cont. (c) Atac picat de la nota Mi_3 del tible, en intensitat "fortissimo".

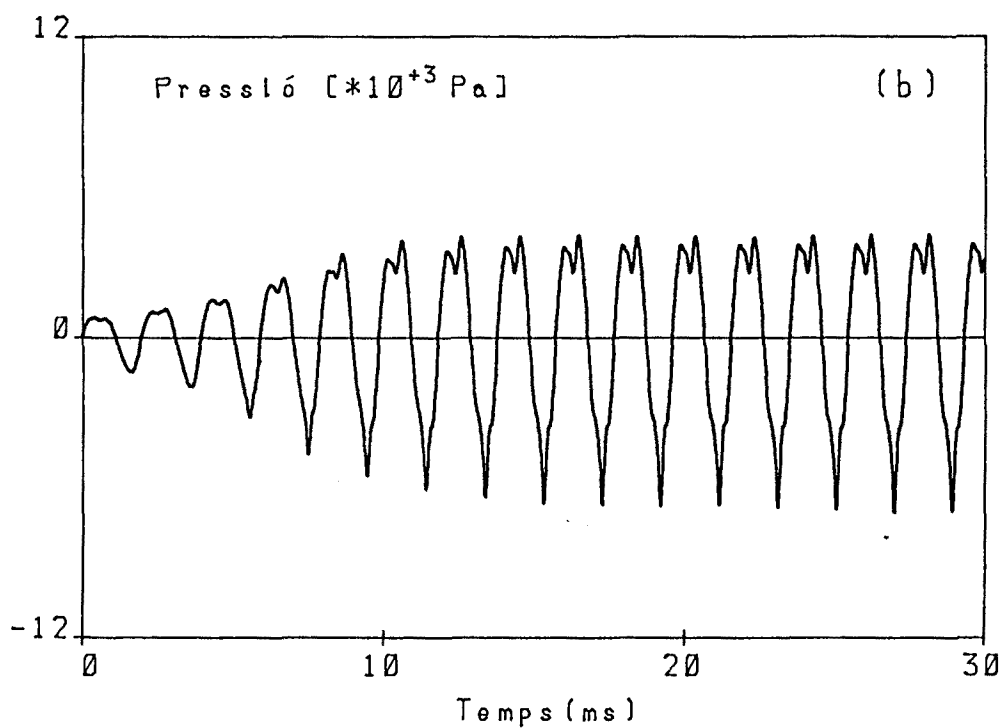
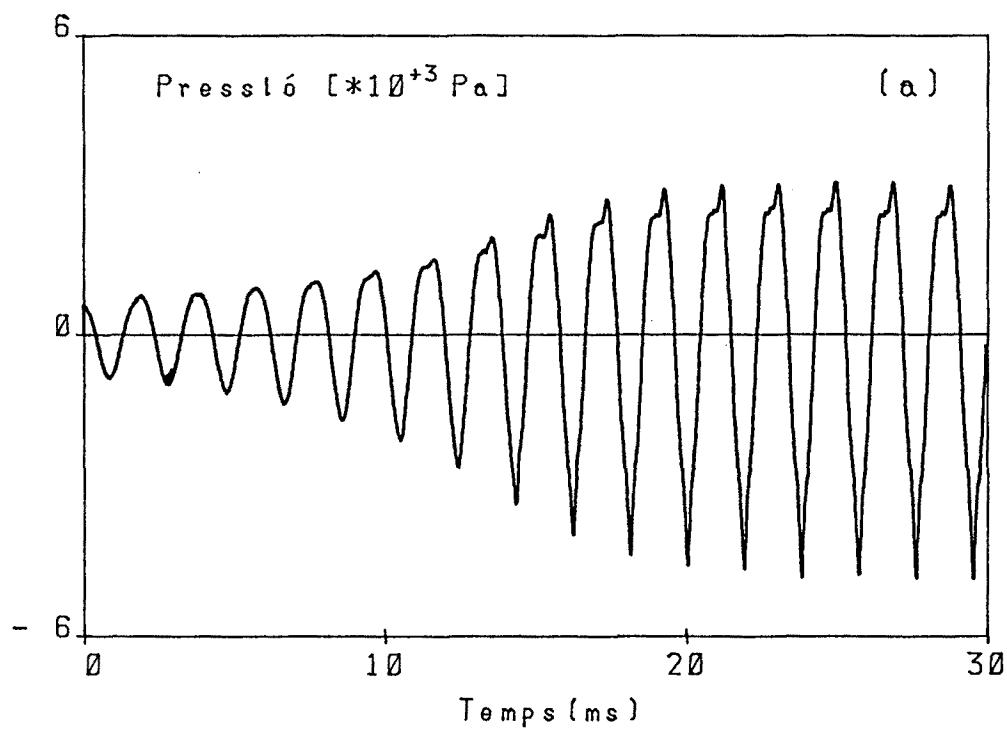


Fig. 2.3-17 Atac picat de la nota Sol₃ del tible.
 (a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

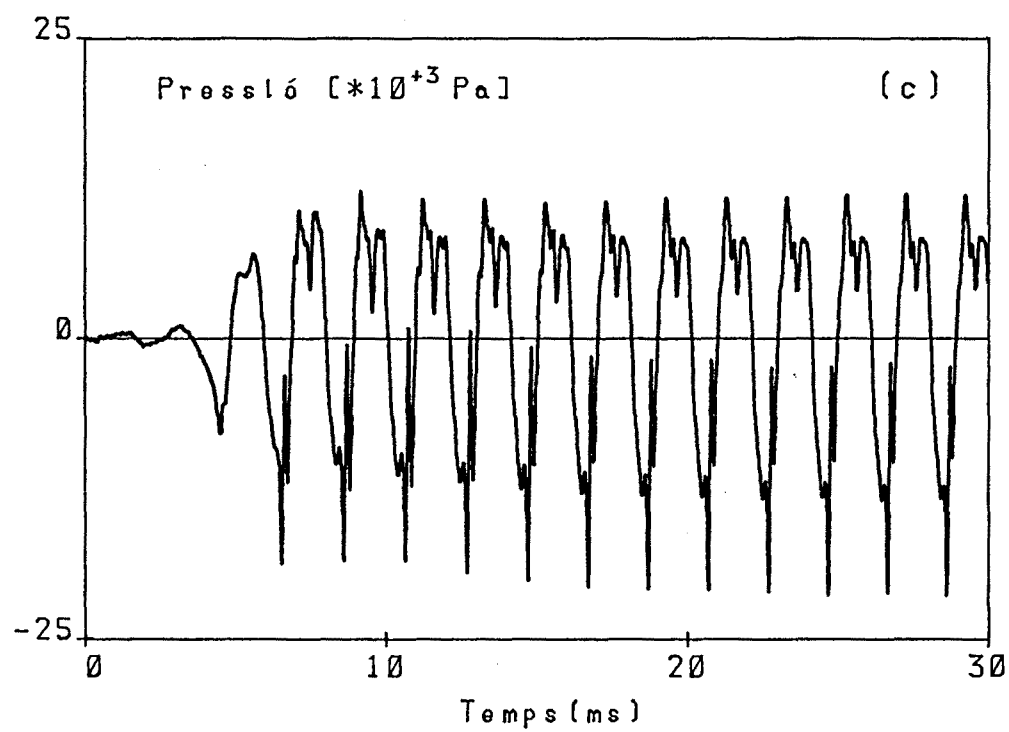


Fig. 2.3-17 cont. (c) Atac picat de la nota Sol₃ del tible, en intensitat "fortissimo".

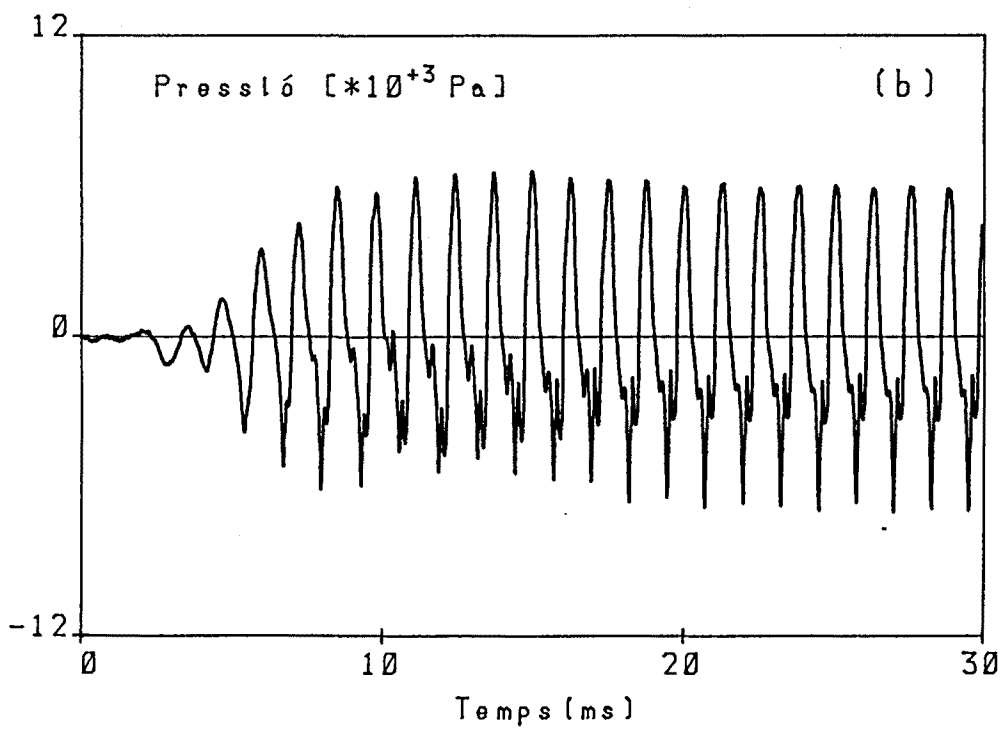
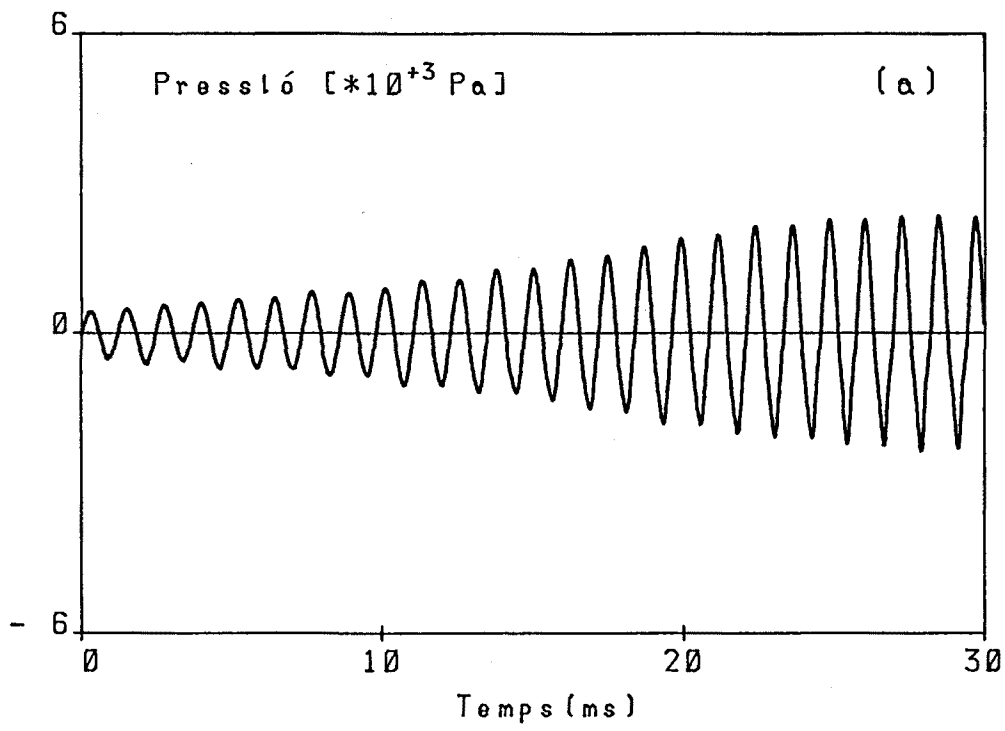


Fig. 2.3-18 Atac picat de la nota Re_4 del tible.
(a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

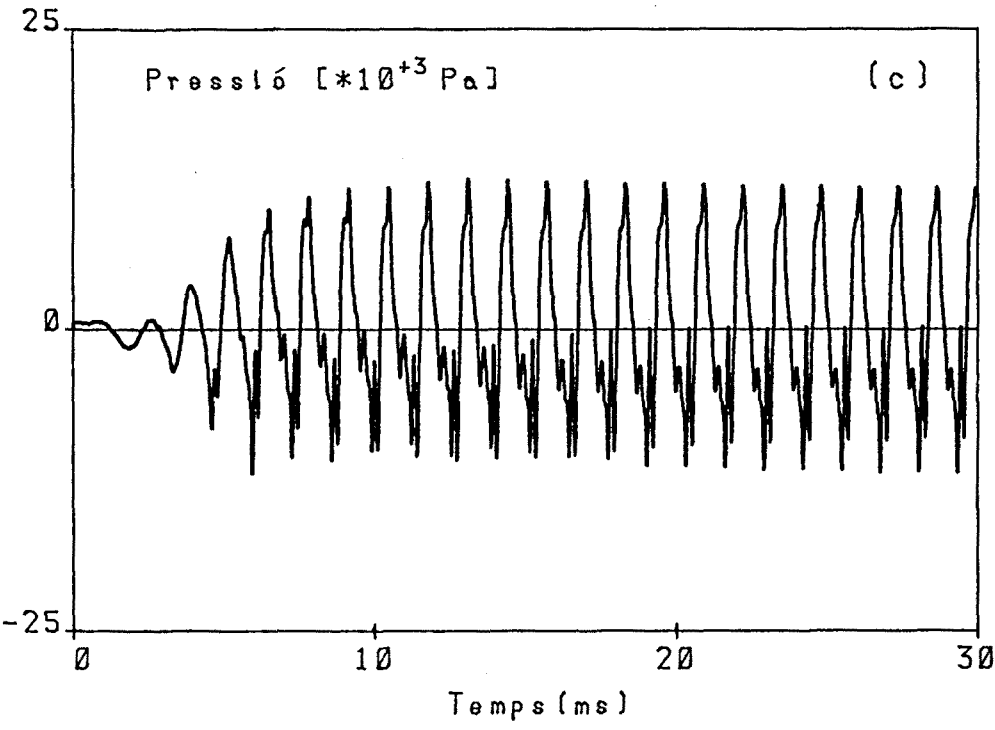


Fig. 2.3-18 cont. (c) Atac picat de la nota Re₄ del tible, en intensitat "fortissimo".

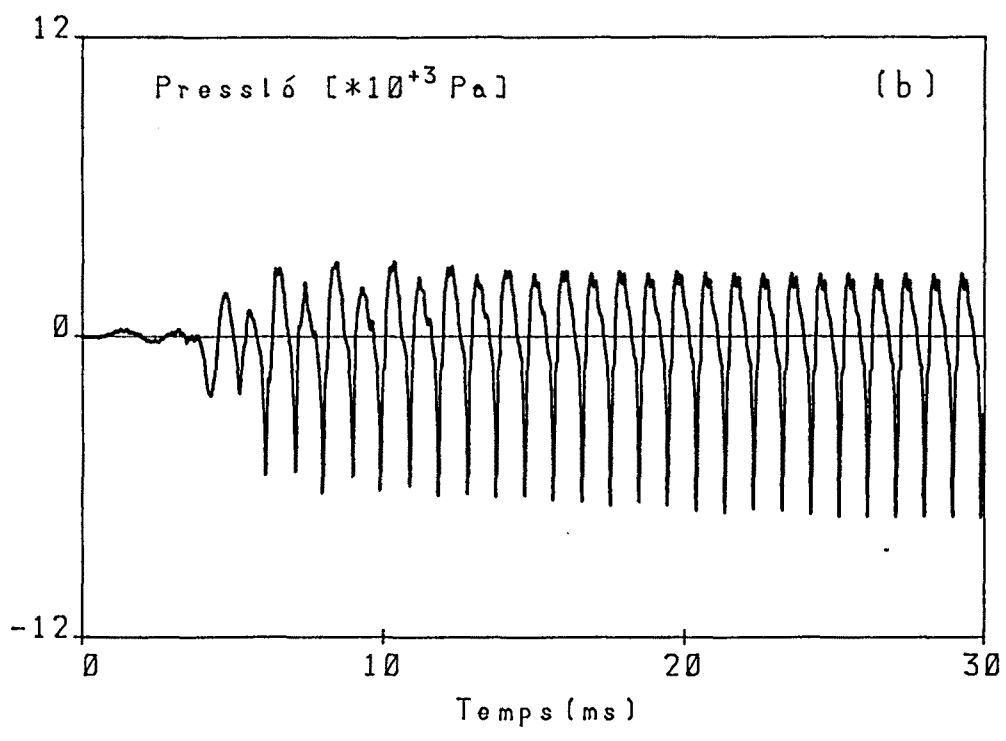
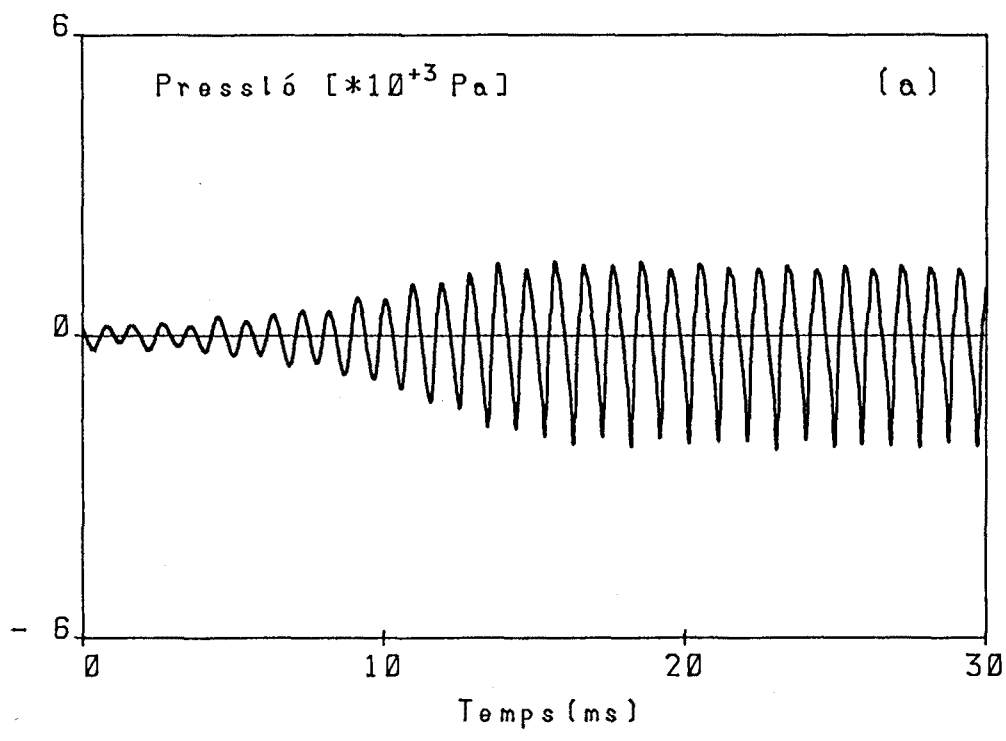


Fig. 2.3-19 Atac picat de la nota Sol₄ del tible.
 (a) En intensitat "piano". (b) En intensitat "forte".

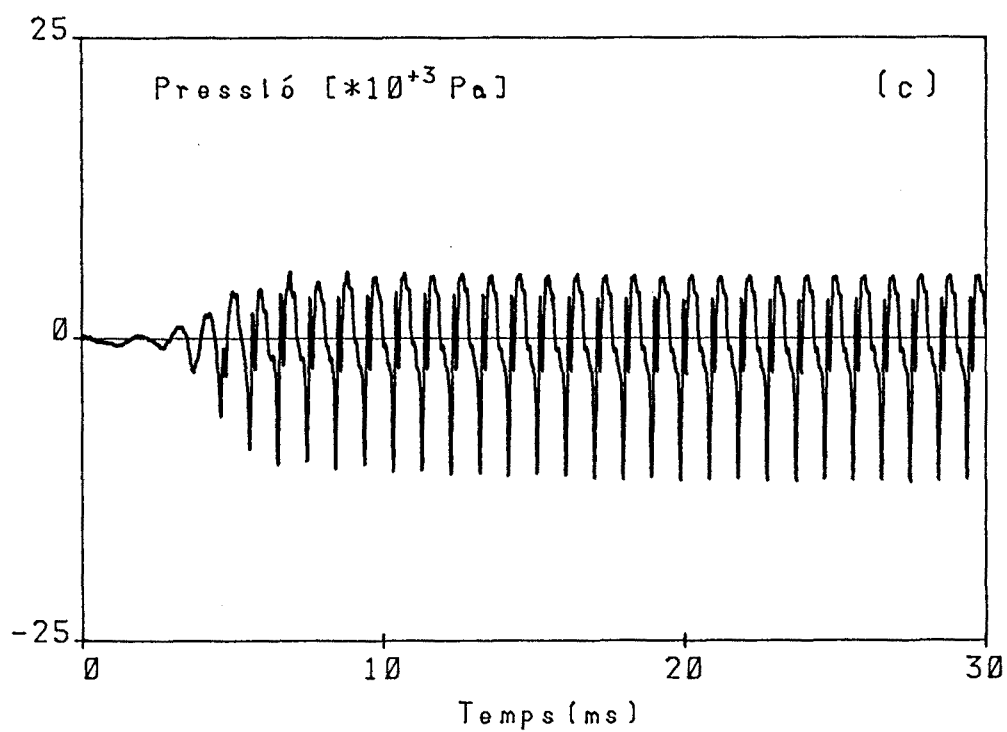


Fig. 2.3-19 cont. (c) Atac picat de la nota Sol₄ del tible, en intensitat "fortissimo".

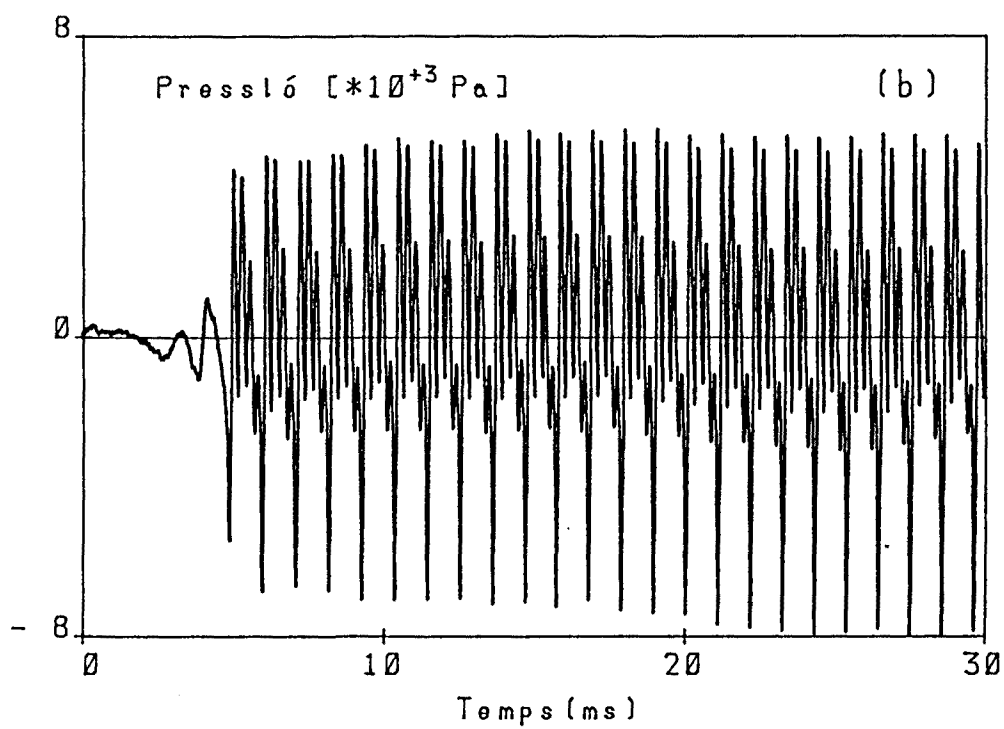
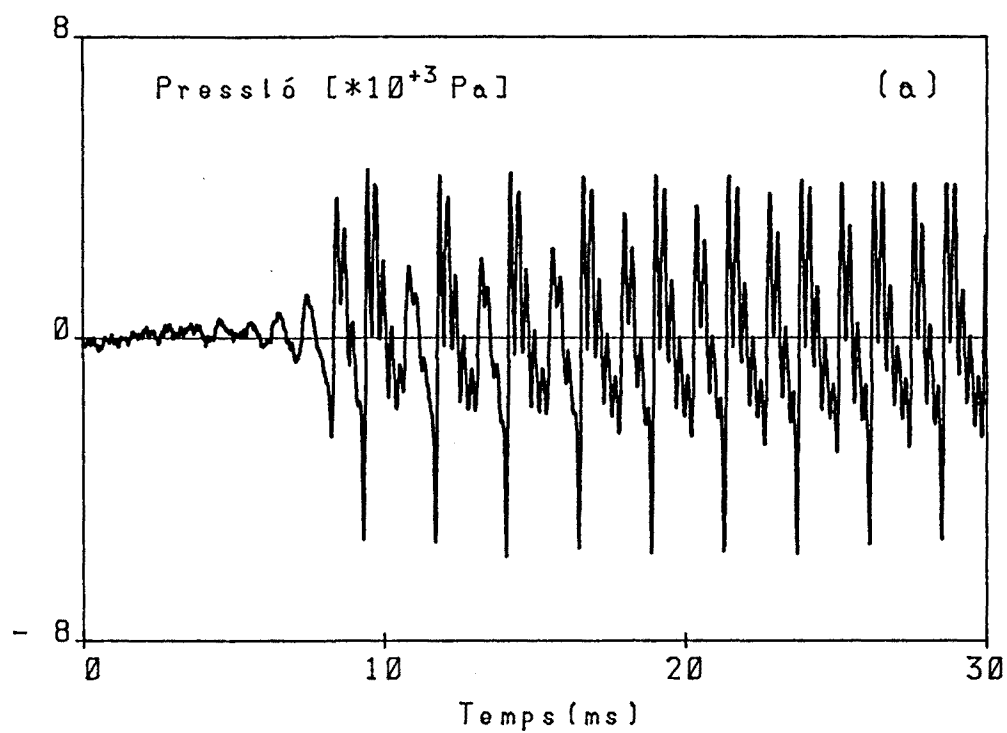


Fig. 2.3-20 Rogall (a) i xiulet (b) d'una canya de tible.

produeix el tancament a cada cicle. Si es compara el xiulet amb el que s'obtingué amb la canya de tenora s'observa que el primer presenta unes fluctuacions de pressió més intenses i més ràpides que el segon. Quelcom semblant s'observa en comparar els dos rogalls. Hi han dos factors que justifiquen aquest fet: La canya de tible és de dimensions més reduïdes que la de tenora, i per tant la seva resposta dinàmica és més ràpida. I per altra banda, el tudell de tible és més curt que el de la tenora, amb la qual cosa les reflexions que es produeixen a la seva secció de sortida presenten una periodicitat més petita.

2.4. CONCLUSIONS DELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

De l'anàlisi dels resultats experimentals presentats a l'apartat anterior se'n poden extreure les següents conclusions:

Els atacs picats forte i fortissimo tant del tible com de la tenora són molt ràpids, presentant un transitori inicial que oscil·la entre dos i cinc períodes de la nota. Els atacs picats-piano i sobre tot els atacs bufats són més lents, depenent la seva durada principalment de la manera en que l'instrumentista executa l'atac.

En tots els atacs s'observa una depressió a cada cicle associada al tancament de la canya causat pel mecanisme d'autoexcitació. A mesura que la intensitat de la nota és més elevada, la depressió és més forta, signe d'un tancament més sobtat de la canya.

Les notes més agudes presenten una fluctuació de pressió positiva més intensa que les notes greus, degut a que les primeres s'executen amb la canya més premuda.

Els atacs del tible són en tot anàlegs als de la tenora, essent la forma d'ona en els atacs piano aproximadament sinusoïdal ja que la tessitura del tible és més alta que la de la tenora, i per tant el contingut espectral és més pobre en harmònics d'alta freqüència.

Els xiulets i els rogalls del tible presenten una període més curt que els de la tenora perquè les dimensions tant de la canya com del tudell del tible són més reduïdes.

Finalment, l'anàlisi de l'evolució temporal del contingut espectral dels atacs, si bé ha estat una tècnica emprada per diferents autors en l'estudi de les característiques dels atacs de diversos instruments, no s'ha mostrat com una tècnica adequada en el cas del tible i la tenora degut a la rapidesa amb que s'estableixen els atacs d'aquests instruments.

3. MESURA I ANÀLISI DE L'AFINACIÓ EN TEMPS REAL.

3.1. PLANTEJAMENT I OBJECTIUS.

3.2. EL MUNTATGE EXPERIMENTAL.

3.3. DESCRIPCIÓ DEL DETECTOR DE FONAMENTALS.

3.4. ALGORISMES PER A LA DETERMINACIÓ DEL PERÍODE.

- . Algorisme de comparació ràpida.
- . Algorisme de multiconvolució.

3.5. AVALUACIÓ DE LES CARACTERÍSTIQUES DEL DETECTOR DE FONAMENTALS.

3.6. ELS RESULTATS EXPERIMENTALS. PRESENTACIÓ I ANÀLISI.

- . L'afinació de la tenora.
- . L'afinació del tible.
- . L'afinació de la dolçaina del País Valencià.

3.7. CONCLUSIONS DELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

3. MESURA I ANÀLISI DE L'AFINACIÓ EN TEMPS REAL.

3.1. PLANTEJAMENT I OBJECTIUS.

La mesura de l'afinació en temps real té per finalitat establir amb precisió quina és l'afinació de l'instrument en condicions reals d'execució musical.

La variació discreta de l'afinació en els instruments de vent s'aconsegueix ja sigui variant la seva longitud -instruments de la família del metall-, ja sigui destapant forats laterals -instruments de la família de la fusta-. L'ajust fi d'aquesta depèn de l'actuació de l'instrumentista sobre el mecanisme d'autoexcitació.

En el cas del tible i la tenora l'actuació de l'instrumentista és important ja que, en ser instruments governats per una doble canya, presenten un ampli camp de llibertat pel que fa a la seva afinació, el qual pot arribar a tenir una extensió de mig to.

Aquesta característica pròpia dels instruments de doble canya es relaciona amb el tipus de mecanisme d'autoexcitació que s'estableix. La freqüència del fonamental un cop s'arriba al règim estacionari depèn no tan sols de la longitud efectiva de la columna d'aire -longitud física des de l'extrem d'entrada fins el forat corresponent a la nota més la correcció d'extrem associada- sinó també del retard que introdueix el mecanisme d'autoexcitació.

Tal com s'exposa al capítol 6, l'autoexcitació en els instruments de doble canya es produeix fonamentalment gràcies a l'anomenat mecanisme de Bernoulli. Aquest mecanisme, relacionat amb la dinàmica del flux d'aire que passa a través de les llegüetes de la doble canya, produeix el tancament ràpid d'aquesta a cada cicle i introdueix un retard funció de l'obertura de la canya i del cabal d'aire que entra dins de l'instrument. Quan el músic força l'afinació, prement més fort la canya entre els llavis i/o augmentant el cabal d'entrada, aconsegueix fer més intens el mecanisme de Bernoulli i com a conseqüència el tancament de la canya és més ràpid. El resultat final és un retard més petit i per tant un augment de la freqüència del fonamental.

L'afinació depèn per tant de factors relacionats amb la tècnica d'execució musical, com són: La intensitat amb que l'instrumentista executa cada nota, la forma d'atac que emprà en iniciar cada nota, i la utilització del "vibrat" -tècnica emprada per tal de millorar la qualitat musical del so, i que consisteix en produir una lleu fluctuació del to mitjançant el control del cabal introduït a l'instrument-.

La mesura de l'afinació permet analitzar la influència d'aquests factors. I pel que fa al diapasó que emprà cada instrumentista, permet establir -ne el valor concret el qual es troba comprès entre el diapasó "normal", que estableix el La_3 del piano en 440 Hz de freqüència fonamental, i el diapasó "brillant", que oscil·la entre un quart de to i un semitó per sobre del normal. El diapasó normal, acceptat oficialment com a referència, és l'emprat en la major part de conjunts instrumentals, però gran quantitat de cobles, preferentment gironines i empordaneses, empen el diapasó brillant per tal de donar un caràcter més viu a la música de dansa.

La mesura de l'afinació en temps real requereix d'una tècnica que permeti la determinació precisa de la freqüència del fonamental del so emès, amb la suficient rapidesa per tal d'observar la seva evolució temporal. Aquests requeriments fan inviable la utilització de les tècniques més correntment emprades.

Els freqüencímetres convencionals, malgrat permetre una determinació acurada de la freqüència del fonamental en temps real, no són adequats quan es tracta d'analitzar sons amb formes d'ona complexes com ara els produïts pels instruments de doble canya com el tible i la tenora -figura 3.1-1-. La complexitat de la forma d'ona prové de la presència d'un gran nombre de components harmònics d'amplitud variable, la qual pot ser superior a la del component fonamental; i fins i tot el component fonamental pot ser-hi pràcticament absent. Aquest fet provoca que per causa del principi de funcionament dels freqüencímetres, que consisteix en amidar el temps transcorregut entre passos del senyal per un nivell de referència, la lectura del període no sigui correcta.

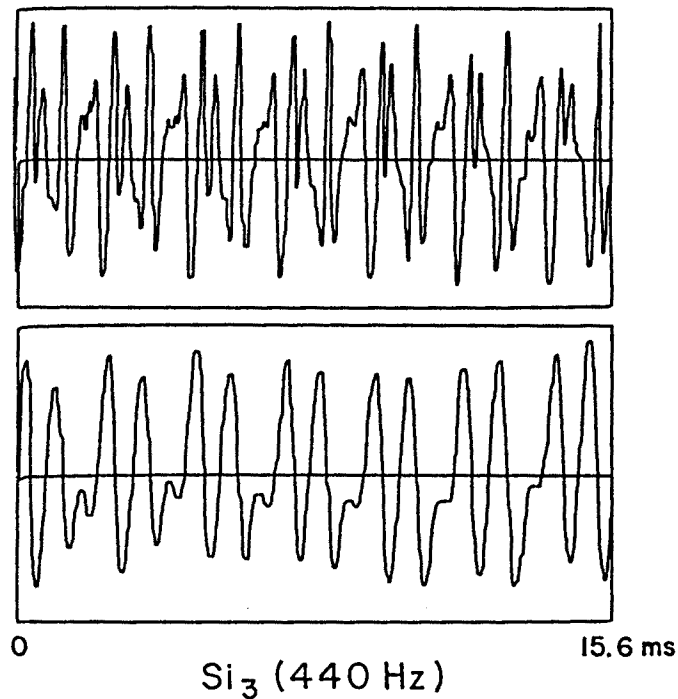


Fig. 3.1-1 Forma de l'ona radiada de la nota Si₃ de la tenora. A la part superior sense filtrar. A la part inferior filtrada amb un filtre passabanda entre 100 Hz i 1300 Hz.

L'anàlisi freqüencial, realitzat mitjançant algorismes per al càlcul de la Transformada de Fourier o emprant un filtre passabanda sintonitzable, tampoc es mostra com una tècnica adequada ja que no permet reunir simultàneament ambdós requeriments: Rapidesa i precisió.

Davant la manca d'una tècnica satisfactòria per a mesurar la freqüència del fonamental, s'ha projectat i desenvolupat un instrument, basat en un microprocessador, que determina el període del fonamental per procediments que guarden certa analogia amb els procediments psicoacústics de percepció del to. A aquest instrument se li ha donat el nom de *detector de fonamentals*.

El sistema auditiu detecta el to a partir de la identificació de la periodicitat

del senyall recollit per l'oïda externa i codificat per mitjà d'una distribució espai-temporal d'impulsos nerviosos. La codificació es realitza a través de la xarxa nerviosa que connecta la membrana basilar de l'oïda amb la zona cerebral corresponent. Es a nivell cerebral on es produeix el procés, encara poc conegut, d'identificació de la periodicitat (Roederer 1973).

La hipòtesi més acceptada, pel que fa referència al procés d'identificació, proposa que la periodicitat es detecta a partir de la comparació del senyal enregistrat en forma d'impulsos amb sí mateix decalat un cert retard. Quan la coincidència en la comparació és màxima, el retard correspon a la periodicitat del senyal. L'instrument desenvolupat reproduïx bàsicament el mateix procediment.

Amb el detector de fonamentals s'han realitzat mesures del període del fonamental de l'ona radiada pel tible i la tenora en diferents circumstàncies: En executar notes aïllades i escales musicals amb diferents intensitats i formes d'atac. Els resultats obtinguts, juntament amb la valoració musical aportada pels instrumentistes que han col·laborat en els assaigs, han permès relacionar l'afinació amb les condicions d'execució. La determinació del diapasó s'ha realitzat mesurant l'afinació de tenores ajustades a cada tipus de diapasó -normal o brillant-.

També s'han realitzat mesures d'afinació amb dolçaines del País Valencià. Aquestes mesures han estat un primer pas en l'estudi científic d'aquest tipus d'instruments, fins ara força oblidats (Ortí 1986).

Finalment, i com a complement de les mesures d'afinació realitzades amb tibles i tenores, s'inclouen els espectres obtinguts per a diferents notes a fi d'analitzar la influència del color tímbric en la percepció subjectiva del to, per bé que sigui una línia en la qual no s'ha aprofundit.

3.2. EL MUNTATGE EXPERIMENTAL.

L'estudi de l'afinació s'ha dut a terme emprant el muntatge experimental mostrat a la figura 3.2-1 i esquematitzat a la figura 3.2-2. El muntatge està constituït pels següents elements:

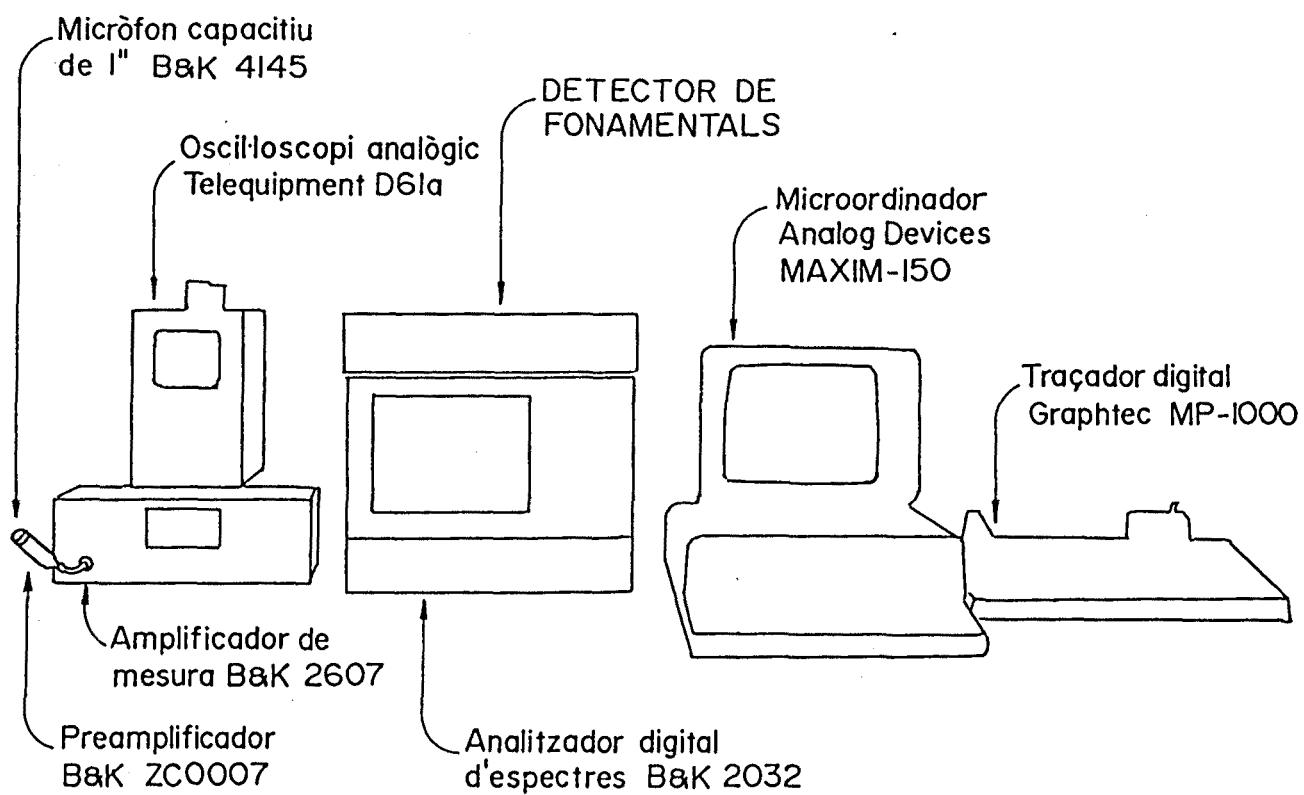
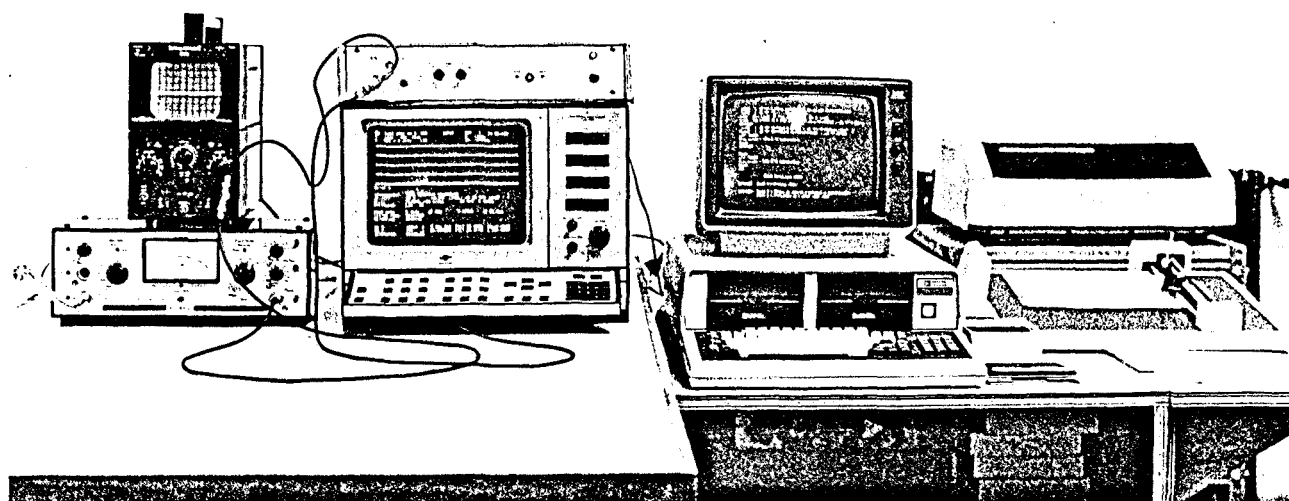


Fig. 3.2-1 Muntatge experimental per a la mesura de l'afinació en temps real.

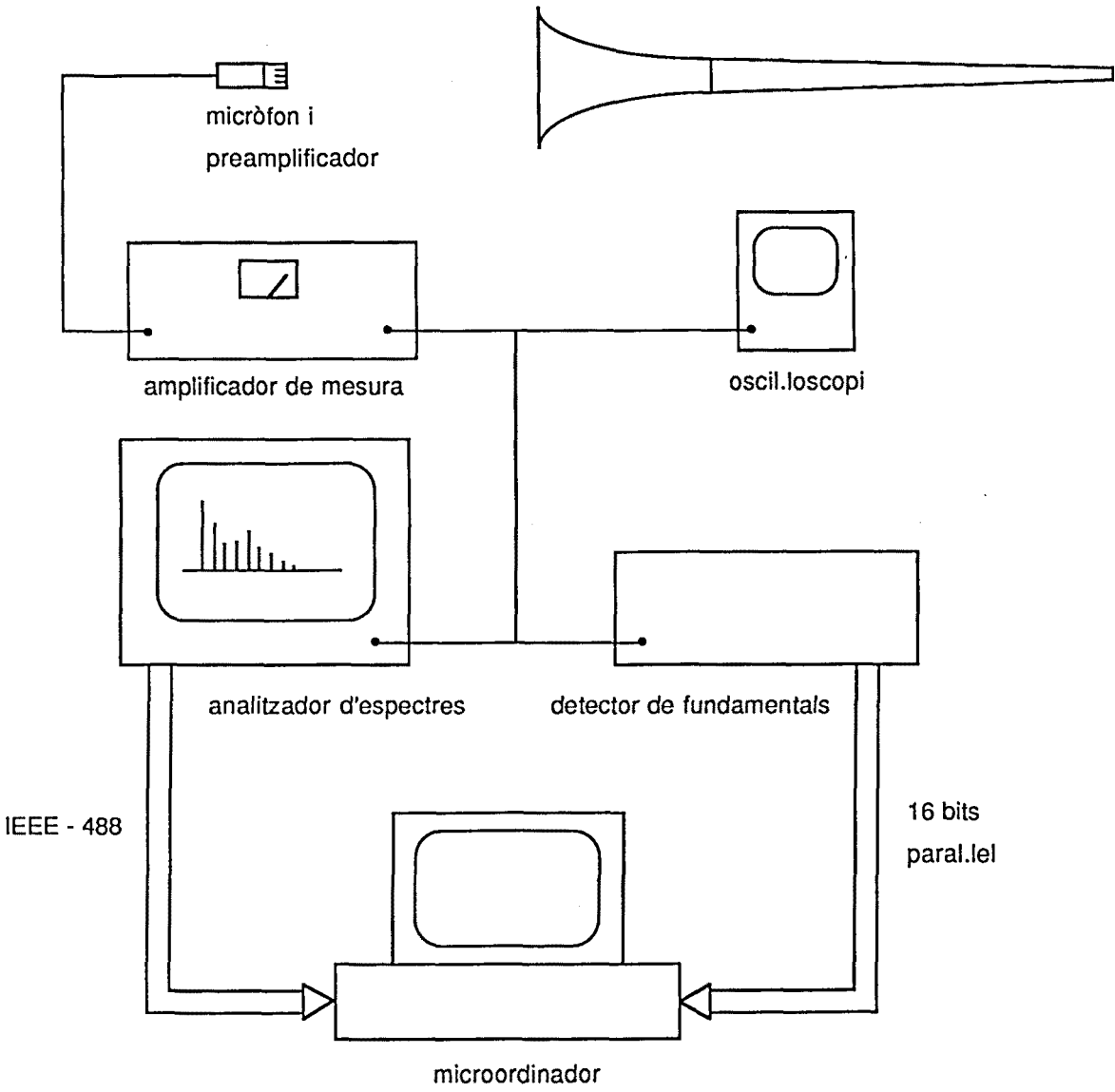


Fig. 3.2-2 Esquema del muntatge experimental per a la mesura de l'afinació en temps real.

Micròfon capacitiu de 1" de diàmetre, Brüel & Kjær model 4145 n/s 406599.

Preamplificador B & K model ZC0007.

Amplificador de mesura B & K model 2607 n/s 391703.

Oscil·loscopi analògic Telequipment model D61a.

Detector de fonamentals. Instruments desenvolupat per l'autor al Laboratori de Mecànica i Vibracions de l'E.T.S.E.I.B.

Analitzador digital d'espectres B & K model 2032 n/s 1062367.

Microordinador Analog Devices model MACSYM-150 n/s 150.

Traçador digital Graphtec model MP-1000 n/s 4040923.

El procediment de mesura és el següent:

El músic executa una nota o un passatge musical i el so emès per l'instrument és captat pel micròfon. Aquest presenta una resposta freqüencial plana fins a 12,5 kHz, suficient per captar tot el contingut espectral del so.

El senyal captat és amplificat amb l'amplificador de mesura i tramès al detector de fonamentals, o bé a l'analitzador per tal de determinar el període del fonamental o obtenir el seu espectre respectivament.

Finalment el microordinador realitza les funcions de tractament i representació dels resultats. Recull els espectres obtinguts amb l'analitzador per a ser emmagatzemats en disc i representats gràficament mitjançant el traçador digital. I també llegeix les mesures del període del fonamental efectuades pel detector, a un ritme de 100 determinacions per segon, i les emmagatzema per al seu tractament i visualització. La capacitat de memòria del microordinador permet emmagatzemar informació de passatges musicals que arribin fins als 2' 30" de durada.

En l'estudi de l'afinació cal considerar l'efecte que provoca l'acústica del local on es realitzen les mesures. Les condicions acústiques d'aquest -freqüències pròpies i temps de reverberació-, fan variar la composició espectral del so que arriba a l'instrumentista i afecten la seva percepció. Considerant la dependència de l'afinació respecte de l'actuació de l'instrumentista, les mesures poden diferir de les que correspondrien si aquest interpretés a l'aire lliure.

El programa desenvolupat per a la lectura i tractament dels períodes realitza les següents tasques: En primer lloc identifica els diferents segments de lectures consecutives del període, corresponents a les diferents notes, i en calcula la freqüència del fonamental mitjana així com la desviació tipus. En segon lloc compara la freqüència mitjana amb la freqüència teòrica que correspondria a la nota en qüestió, d'acord amb l'escala temperada de l'instrument, i en determina la diferència en centèsimes de semitó segons l'expressió:

$$\text{Diferència(Cmes. semitó)} = 1200 \log_2 (f_{\text{mitjana}} / f_{\text{teòrica}}). \quad (3.2.1)$$

Els resultats s'obtenen per pantalla o bé mitjançant un llistat d'impressora.

Per últim el programa permet visualitzar gràficament l'evolució temporal de la freqüència del fonamental. La representació s'obté emprant una escala lineal de freqüències o bé una escala en octaves -escala logarítmica en base 2- més adequada per a la representació d'interval musicals. El programa també permet representar la desviació en centèsimes de semitó per a cadascuna de les notes.

3.3. DESCRIPCIÓ DEL DETECTOR DE FONAMENTALS.

El detector de fonamentals està constituït per un microprocessador INTEL 8085 de 8 bits, amb 2 kbytes de memòria ROM i 512 bytes de memòria RAM, i per un circuit de mesura, representat a la figura 3.3-1, que codifica la forma d'ona captada pel micròfon. El procés de codificació es descriu a continuació.

El senyal provinent de l'amplificador de mesura és filtrat amb un filtre passabanda de banda ampla que elimina el component continu del senyal i els harmònics més elevats. Les freqüències de tall del filtre són 100 Hz, sensiblement inferior a la del fonamental més greu a amidar, i 1300 Hz, sensiblement superior a la del fonamental més agut a amidar. Sense aquest filtrat previ, la determinació del període del fonamental es veu molt dificultada per causa de la complexitat i la fluctuació que presenta la forma d'ona del so emès.

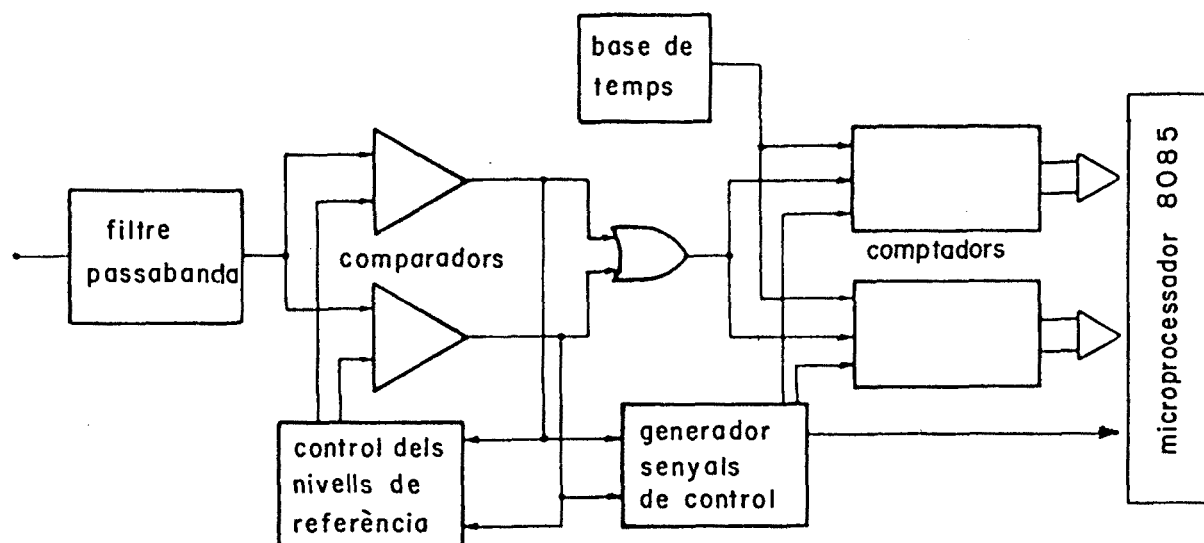


Fig. 3.3-1 Esquema del circuit de codificació de la forma d'ona.

Mitjançant un circuit de comparació, s'obté un nou senyal digitalitzat amb tres nivells derivat directament del senyal original -figura 3.3-2-. El circuit empra dos nivells de referència de manera que quan el senyal original és més gran que el nivell de referència superior, s'associa el valor +1 al senyal resultant; i anàlogament quan el senyal original és més petit que el nivell de referència inferior, se li associa el valor -1. Per últim si el senyal original rau entre els dos nivells de referència es considera que el senyal resultant és zero.

Els nivells de referència s'ajusten automàticament en funció del valor màxim del senyal original de manera que només els pics més grans, els més significatius de la forma d'ona, són tinguts en compte.

El senyal digitalitzat obtingut d'aquesta forma presenta la mateixa periodicitat que el senyal original -podria presentar una periodicitat múltiple, però aquest fet no ha estat causa de dificultat en el cas dels sons musicals estudiats- i per tant, a efectes de mesurar el període del fonamental, no representa cap pèrdua d'informació.

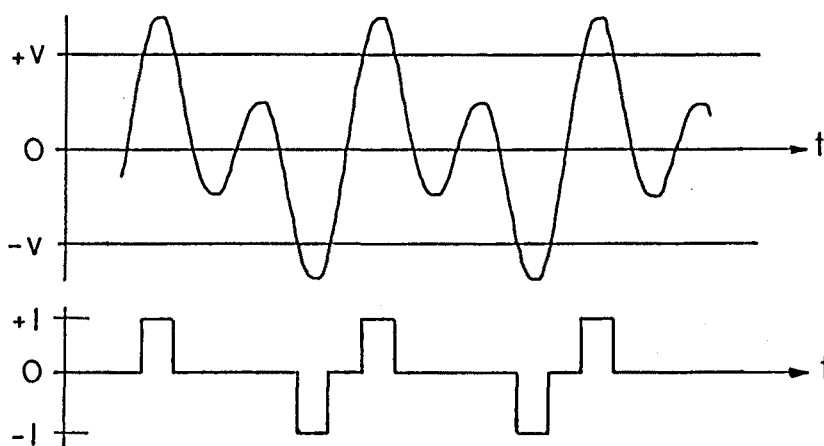


Fig. 3.3-2 Codificació de la forma d'ona mitjançant un senyal de tres nivells.

La codificació finalitza amb la mesura del temps existent entre dos flancs successius del senyal digitalitzat per mitjà de dos comptadors que actuen alternativament per tal de no perdre cap lectura. Els comptadors són de 14 bits i empen una base de temps de 1 MHz, amb la qual cosa s'obté una resolució temporal de $\pm 1 \mu\text{s}$.

Per últim els 14 bits que contenen la informació temporal més dos bits que codifiquen el tres nivells del senyal digitalitzat, són tramesos al microprocessador que realitza la determinació del fonamental.

La forma escollida per a codificar el senyal original presenta avantatges davant la codificació usual obtinguda amb els conversos Analògics-Digitals. Es més ràpida, requereix menys memòria per emmagatzemar les dades i permet una millor resolució temporal comparada amb la que s'obté a partir del mostreig amb un conversor convencional.

A l'apèndix I s'exposen amb més detall els esquemes electrònics de les diferents parts del circuit de mesura.

3.4. ALGORISMES PER A LA DETERMINACIÓ DEL PERÍODE.

S'han desenvolupat i implementat en el microprocessador dos algorismes per a la determinació del període del fonamental. Ambdós processen la informació recollida pel circuit de mesura i, mitjançant un procés de comparacions, determinen el fonamental. Però mentre que el primer algorisme realitza un procés de comparació ràpid, molt adequat per als casos de sons que variïn ràpidament de freqüència del fonamental, el segon, encara que més lent, és més segur a l'hora d'analitzar sons amb formes d'ona complexes.

Algorisme de comparació ràpida.

Aquest algorisme prescindeix de la informació associada a la magnitud del senyal digitalitzat i empra solament la informació temporal, obtinguda amb un únic nivell de referència.

La base de l'algorisme és un registre de desplaçament de tres posicions que conté tres lectures de temps successives. S'inicia un cicle de l'algorisme cada cop que el microprocessador rep una nova lectura. Aquesta es guarda a la primera posició del registre i obliga totes les lectures anteriors a desplaçar-se una posició en el registre. Com a conseqüència es perd la lectura menys recent que ocupava la darrera posició del registre.

L'estat actual del registre de desplaçament es compara amb el contingut d'un altre registre de referència que conté tres lectures de temps successives obtingudes en inicialitzar-se l'algorisme. Si els valors comparats coincideixen dos a dos, amb una certa tolerància que s'ha establert en el 6%, es considera identificat el període. En cas contrari la lectura més recent es guarda en un acumulador i el microprocessador espera una nova dada temporal per iniciar un nou cicle.

La concordància en el contingut d'ambdós registres es produeix quan entre les lectures emmagatzemades respectives hi ha un decalatge temporal igual a un període. El contingut de l'acumulador correspon aleshores al valor del període del fonamental mesurat en microsegons.

Cada cop que s'ha identificat un període, el contingut del registre de

desplaçament substitueix al del registre de referència i comença de nou el cicle. D'aquesta manera s'aconsegueix que l'algorisme sigui capaç d'adequar-se a les variacions del senyal, tant de forma d'ona com de freqüència del fonamental. Si després de 10 comparacions no s'ha identificat el període, el programa genera un senyal d'avís i l'algorisme comença de nou.

La figura 3.4-1 representa el procés de determinació del període per al cas d'un senyal que presenti quatre lectures temporals per període, i la figura 3.4-2 correspon al diagrama de blocs de l'algorisme.

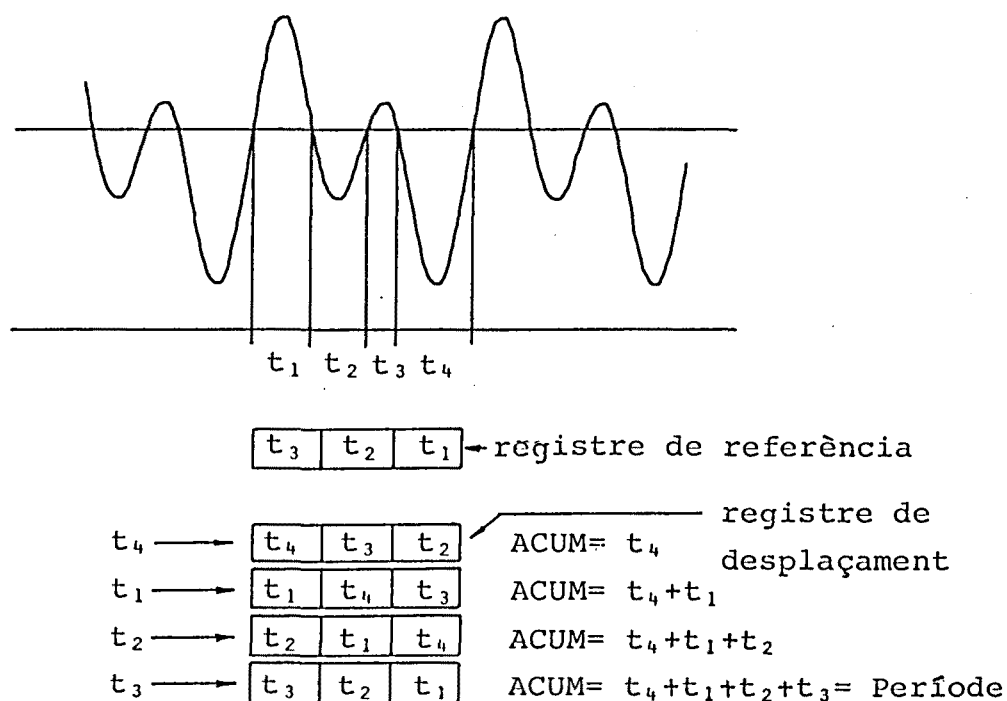


Fig. 3.4-1 Algorisme ràpid. Procés de determinació del període.

El nombre de posicions dels registres, la tolerància i el nombre màxim de comparacions s'han escollit en funció de la complexitat del senyal i amb el criteri de minimitzar el temps d'execució de l'algorisme, que és de 400 μs . Com

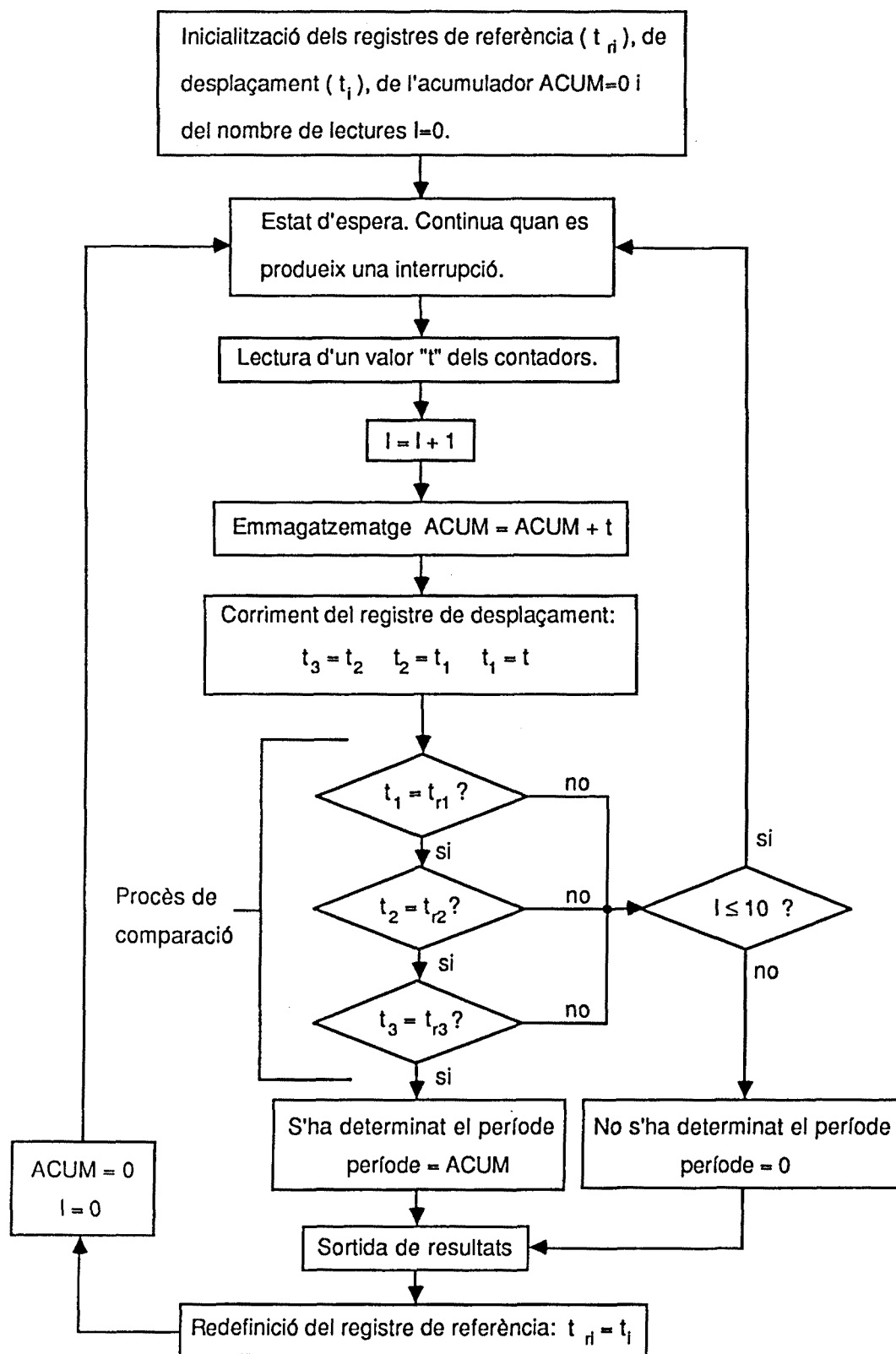


Fig. 3.4-2 Algorisme ràpid. Estructura de l'algorisme.

que l'algorisme treballa síncronament amb el circuit de mesura, executant-se un cicle cada vegada que es llegeix una nova dada temporal, és necessari que no es presentin lectures més petites que el temps d'execució; d'altra manera el sincronisme es perd i la determinació del període es fa inviable. Aquest fet, tot i la rapidesa de càlcul, limita l'aplicació de l'algorisme a sons amb poc contingut d'armònics i de freqüència fonamental per sota de 1kHz.

Algorisme d'autocorrelació.

El segon algorisme determina el període del fonamental a partir de la funció d'autocorrelació del senyal digitalitzat de tres nivells codificat pel circuit de mesura.

La funció d'autocorrelació permet conèixer el grau de concordància existent entre un senyal i ell mateix decalat un temps τ . Per a un senyal estacionari $x(t)$, la funció d'autocorrelació es defineix com (Papoulis 1965, Newland 1975)

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) x(t+\tau) dt, \quad (3.4.1)$$

on T representa la durada del senyal i τ el decalatge o retard.

A la pràctica, en disposar sols d'un registre temporal de durada T finita, una estimació de la funció d'autocorrelació ve donada per (Newland 1975)

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t) x(t+\tau) dt \quad \text{per a retards positius}$$

$$R_x(-\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_{\tau}^T x(t) x(t-\tau) dt \quad \text{per a retards negatius}$$

(3.4.2)

amb $0 \leq \tau \leq T$.

Per a un senyal periòdic, com el que correspon a un so musical, la funció d'autocorrelació és també periòdica i d'igual període que el senyal, i presenta valors màxims quan el retard τ és igual a un nombre sencer de períodes. La determinació del primer màxim permet per tant determinar el període del fonamental del senyal original.

L'algorisme s'estructura en dues rutines: una rutina principal que calcula la funció d'autocorrelació i en determina el primer màxim, i una rutina de lectura i emmagatzament de la informació codificada pel circuit de mesura.

Aquesta segona rutina s'executa en sincronisme amb el circuit de mesura de manera que cada cop que s'ha realitzat una lectura interrompeix l'execució de la rutina principal per adquirir la dada i emmagatzemar-la en una àrea de memòria de 128 posicions. La forma d'omplir l'àrea de memòria és cíclica de manera que quan s'arriba a omplir la darrera posició, la següent lectura es guarda en la primera. Un índex senyala en tot instant quina és la lectura més recent i controla el procés d'emmagatzematge. El temps d'execució de la rutina és només de 30 μ s la qual cosa garanteix l'obtenció de lectures consecutives i per tant la correcta codificació del senyal digitalitzat.

La rutina principal calcula la funció d'autocorrelació emprant les 25 lectures més recents emmagatzemades a l'àrea de memòria. El càlcul de la funció, que en principi pot semblar llarg i complex, es veu simplificat gràcies a la forma del senyal digitalitzat de tres nivells (Rabiner 1978).

En primer lloc aixó és així perquè només cal conèixer el valor de la funció per als retards corresponents al temps existent entre flancs del senyal ja que forçosament el període del fonamental ha de correspondre a un d'aquests retards. La figura 3.4-3 il.lustra aquest fet.

En segon lloc, l'existència únicament de tres nivells de magnitud, +1, 0 i -1, permet efectuar els productes $x(t) \cdot x(t+\tau)$ emprant la funció lògica OR-exclusiva i obviant d'aquesta manera la utilització de rutines complexes de multiplicació. A més la funció d'autocorrelació que s'obté presenta un valor màxim $R_x(\tau)_{\max.}=1$, la qual cosa simplifica el procés de determinació del període del fonamental.

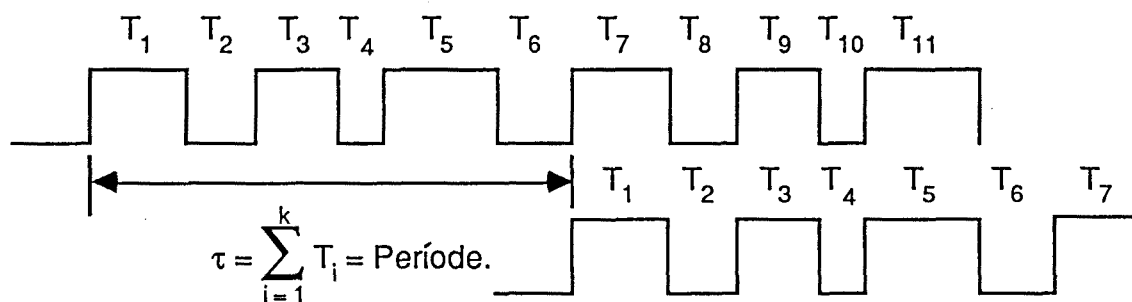


Fig. 3.4-3 Algorisme d'autocorrelació. Determinació del període.

Anàlogament al primer algorisme, si després d'haver determinat la funció d'autocorrelació per a 10 retards consecutius no s'ha identificat el període, el programa genera un senyal d'avís i s'inicia un nou cicle amb nova informació. El temps de càlcul de l'algorisme és de 10 ms la qual cosa permet obtenir 100 determinacions del període per segon, suficients per a observar com varia l'afinació al llarg del temps.

L'estructura de l'algorisme, representada en forma de diagrama de blocs, es mostra a les figures 3.4-4 i 3.4-5.

Per desenvolupar ambdós algorismes s'ha disposat d'un sistema de desenvolupament INTEL-MDS. Aquest sistema ha permès escriure, assaigar i corregir els algorismes, traduir-los a còdi màquina i transferir-los al detector de fonamentals. Un cop obtingudes les versions definitives, aquestes s'han gravat en memòria permanent.

3.5. AVALUACIÓ DE LES CARACTERÍSTIQUES DEL DETECTOR DE FONAMENTALS.

Per analitzar les prestacions del detector de fonamentals i dels algorismes emprats s'han realitzat mesures de la freqüència del fonamental de dos senyals de diferent procedència. Un correspon al so d'una tenora durant l'execució d'una escala musical, del Do_3 -de freqüència del fonamental teòrica de 233,1 Hz- fins al Do_4 -de freqüència del fonamental teòrica de 466,2 Hz-.

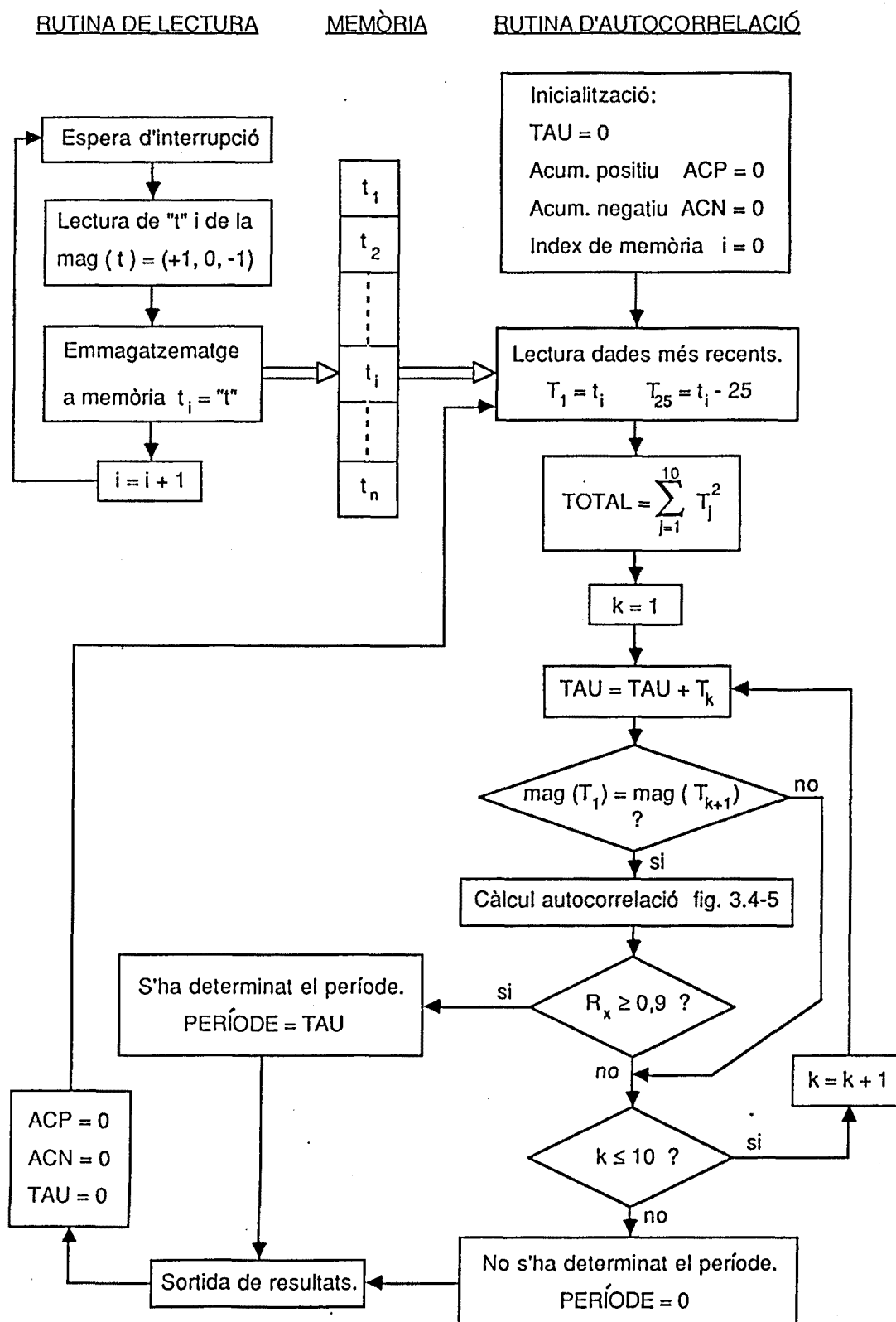


Fig. 3.4-4 Algorisme d'autocorrelació. Estructura general.

CÀLCUL DE LA FUNCIO D'AUTOCORRELACIO.

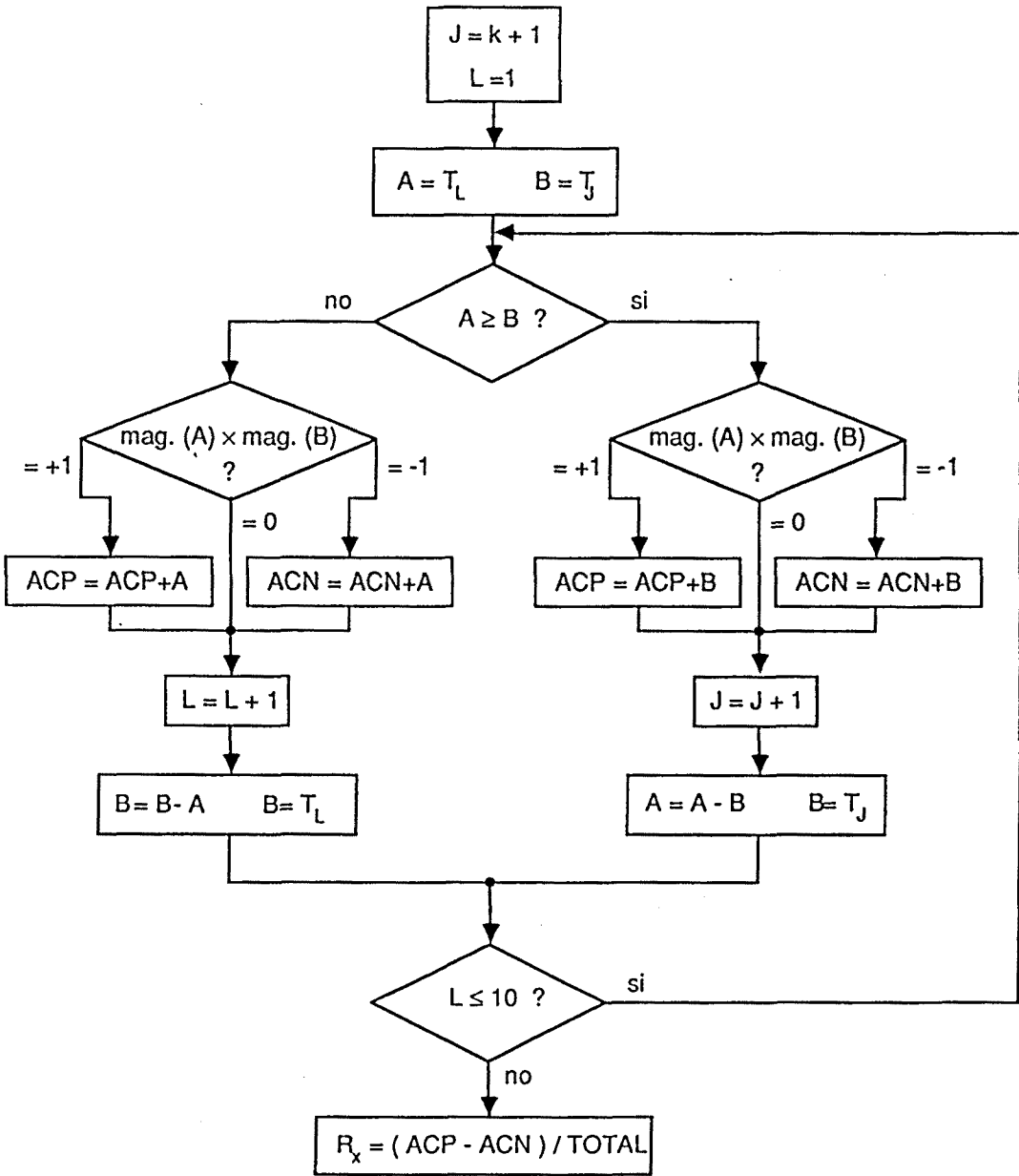


Fig. 3.4-5 Algorisme d'autocorrelació. Càlcul de la funció d'autocorrelació.

L'altre prové d'un acceleròmetre col·locat sobre un sistema mecànic senzill, format per una massa i un bloc de goma que actua com element elàstic i element amortidor al mateix temps, mentre era mogut per mitjà d'un excitador hidràulic que efectuava una escombrada lineal de freqüències entre 50 i 300 Hz. El senyal provinent del sistema mecànic presenta un contingut en harmònics baix i la seva forma d'ona és per tant menys complexa i més regular que la del senyal provinent del so de la tenora.

Els resultats obtinguts per a l'escala musical es mostren en forma d'evolució temporal de la freqüència del fonamental. La figura 3.5-1 presenta el resultat obtingut en emprar l'algorisme de comparació ràpida i la figura 3.5-2 presenta el resultat obtingut amb l'algorisme d'autocorrelació. S'observa com l'algorisme d'autocorrelació determina correctament la freqüència del fonamental, incloent-hi la fluctuació en freqüència pròpia del vibrat. Per contra l'algorisme de comparació ràpida només determina la freqüència ocasionalment, tal com es posa de manifest a la figura 3.5-1 en la qual els trams horitzontals corresponen a aquelles lectures en les que no s'ha identificat el període del fonamental.

Aquest resultat cal atribuir-lo no tan sols a la pèrdua de sincronisme entre el circuit de mesura i l'algorisme sinó també a l'acusada fluctuació en amplitud dels sons procedents de la tenora, la qual cosa dificulta el procés de comparació.

La figura 3.5-3 mostra l'evolució temporal de la freqüència del fonamental del senyal corresponent a l'acceleració del sistema mecànic, obtinguda per mitjà de l'algorisme de comparació ràpida. En aquest cas, en ser més simple la forma d'ona i en no presentar-se una fluctuació d'amplitud, l'evolució lineal de la freqüència queda ben reflectida.

Davant d'aquests resultats s'ha escollit l'algorisme d'autocorrelació per a l'estudi de l'afinació, si bé ambdós algorismes han estat implementats a l'instrument.

Per tal de conèixer de manera més precisa la fiabilitat de l'algorisme d'autocorrelació, s'han determinat els percentatges de lectures errònies i de lectures corresponents a no identificacions del període respecte del nombre

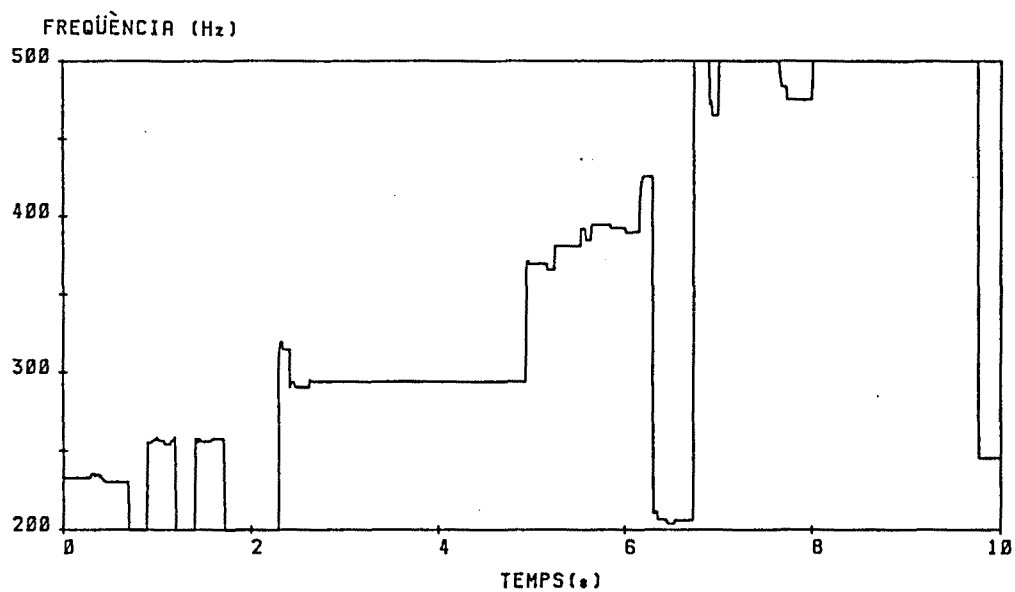


Fig. 3.5-1 Evolució temporal de la freqüència del fonamental del so de la tenora en executar una escala musical, del Do3 al Do4, determinada amb l'algorisme ràpid.

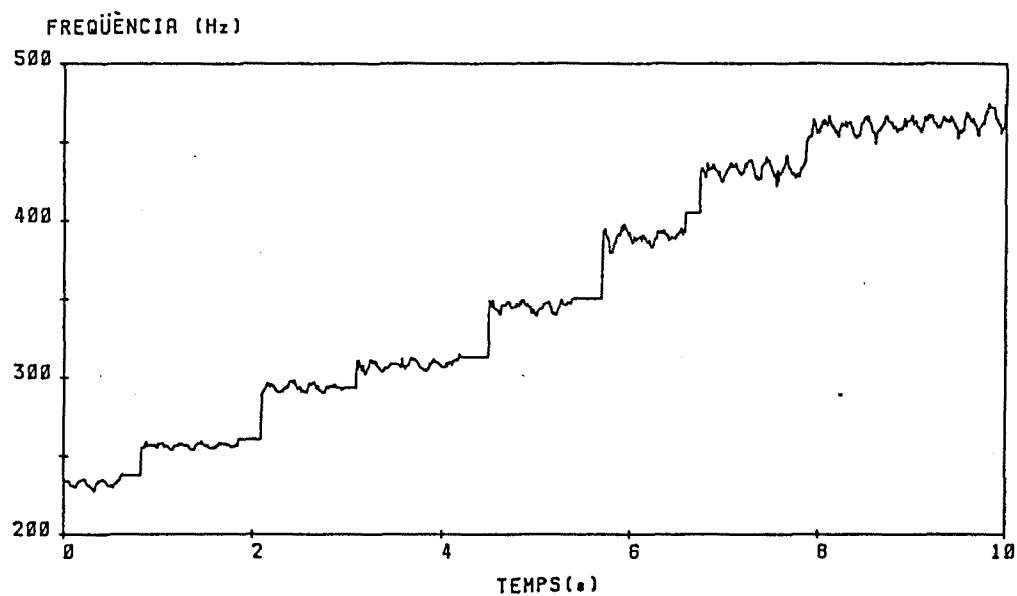


Fig. 3.5-2 Evolució temporal de la freqüència del fonamental del so de la tenora en executar una escala musical, del Do3 al Do4, determinada amb l'algorisme d'autocorrelació.

total de lectures efectuades, per a cadascuna de les notes de l'escala. Els resultats es recullen a la taula 3.5-I.

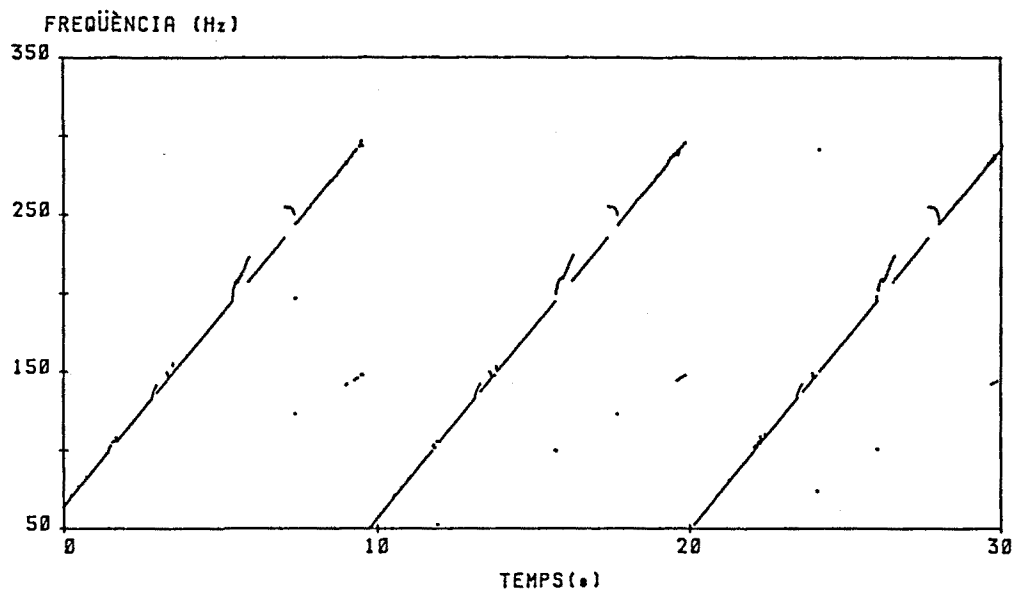


Fig. 3.5-3 Evolució temporal de la freqüència del fonamental del senyal mesurat sobre el sistema mecànic emprant l'algorisme ràpid.

Taula 3.5-I Percentatges de lectures errònies i de lectures corresponents a no identificacions per a l'algorisme d'autocorrelació. Escala del Do₃ al Do₄ de la tenora.

Nota	nº total de lectures	nº errors	%	nº no identificacions	%
Do ₃	90	6	6,7	18	20
Re ₃	120	12	10	23	19,2
Mi ₃	100	8	8	16	16
Fa ₃	130	5	3,8	45	34,2
Sol ₃	100	3	3	20	20
La ₃	120	6	5	24	20
Si ₃	110	0	0	7	6,4
Do ₄	230	2	0,9	33	14,3

Per a totes les notes el percentatge d'errors és petit -per sota del 10%- mentre el de no identificacions és més elevat. Aixó és causat per la presència d'un transitori entre nota i nota durant el qual el senyal deixa de ser periòdic, i per tant l'instrument no determina cap període del fonamental. Els trams horitzontals que s'observen a la figura 3.5-2 corresponen justament a aquests transitoris.

3.6. ELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

Els resultats experimentals que s'exposen en aquest apartat corresponen a les mesures d'afinació realitzades amb tenores, tibles i amb dolçaines del País Valencià. Les mesures s'han obtingut emprant el detector de fonamentals i l'algorisme d'autocorrelació, i consisteixen en l'anàlisi tant d'escales musicals com de notes aïllades.

L'anàlisi d'escales musicals ha permès comparar l'afinació entre les diferents notes i entre diferents condicions d'interpretació, mentre l'anàlisi de notes aïllades ha permès identificar la forma del vibrat.

L'afinació de la tenora.

En l'estudi de l'afinació de la tenora han col.laborat els mateixos instrumentistes que ho feren en l'estudi dels atacs.

La figura 3.6-1 mostra els resultats d'afinació obtinguts per a una tenora Soldevila. Els resultats s'expressen en forma de desviació en centèsimes de semitó respecte de l'afinació corresponent a l'escala temperada normal, la qual es presenta al capítol 1 -taula 1.1-I-, i corresponen a escales executades en tonalitat de Sol Major, esteses als dos registres de l'instrument.

Les escales s'agrupen en dues sèries interpretades pel mateix instrumentista però en dies diferents. La primera sèrie compren una escala executada en diapasó normal i dues més executades en diapasó brillant, mentre la segona compren tres escales executades en diapasó brillant dos dies més tard.

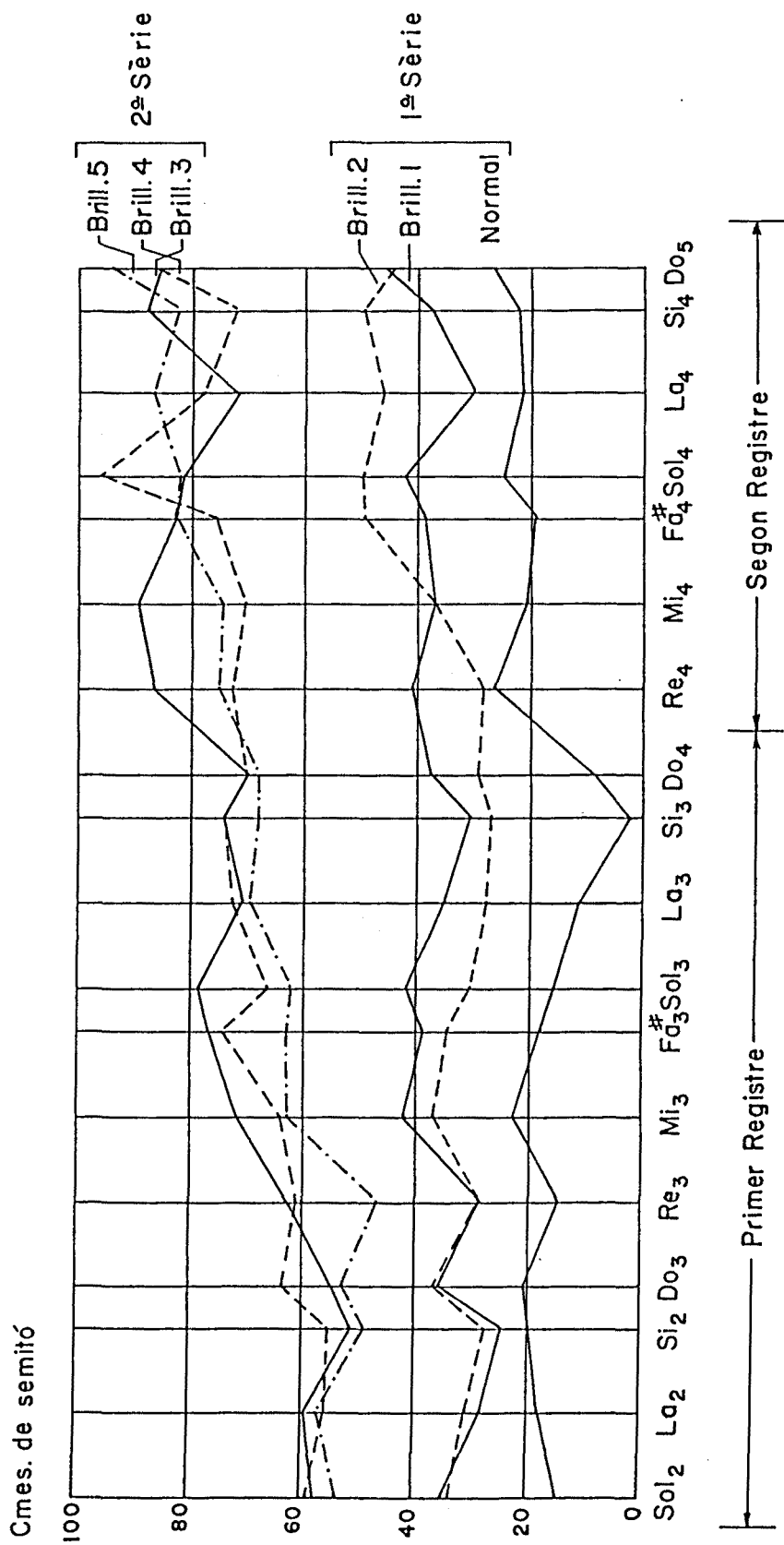


Fig. 3.6-1 Resultats d'afinació obtinguts amb una tenora Soldevila en executar escales en tonalitat de Sol Major.

El pas d'un diapasó a l'altre s'aconsegueix canviant el tudell usualment emprat per tocar en brillant per un de més llarg, la qual cosa fa disminuir la freqüència del fonamental de totes les notes si bé no de manera que es conservi l'afinació correcta per a totes elles. Caldria retocar tots els forats per tal de mantenir una afinació correcta de l'instrument. Malgrat tot, l'ampli camp de llibertat en l'afinació que presenta la tenora permet a l'instrumentista ajustar el to correctament.

Observant la figura 3.6-1 es comprova com l'escala normal presenta una variació màxima entre desviacions de l'ordre de 25 centèssimes de semitó. Aquesta desviació és imperceptible a nivell musical i és perfectament acceptable en instruments d'afinació tan poc rígida com la tenora. El fet que totes les notes estiguin afinades per sobre de l'afinació teòrica és per causa de la dificultat que representa per al músic aconseguir en forma precisa una afinació absoluta sense disposar d'una referència com ara un diapasó que donés el La_3 de 440 Hz, o el fet d'interpretar dins d'un conjunt instrumental on hi haguessin instruments d'afinació fixa -piano, clave, etc.-.

Les dues escales brillants 1 i 2 presenten una variació màxima anàloga a l'anterior, però la desviació respecte de l'afinació teòrica arriba fins a les 35 centèsimes, per sota del valor mínim que s'accepta com a diapasó brillant -50 centèsimes és a dir 1/4 de to-. L'allargament del tudell és per tant insuficient per aconseguir passar d'un diapasó a l'altre.

Per contra les escales brillants 3,4 i 5 que conformen la segona sèrie presenten desviacions entre 50 i 90 centèssimes. Comentant aquest resultat amb l'instrumentista que col.laborava en l'assaig es va constatar la seva intenció de produir un brillant clarament més definit que no pas l'obtingut en la primera sèrie. Es demostra així la decisiva intervenció del músic en l'ajust de l'afinació.

Totes les escales brillants obtingudes mostren una tendència a augmentar la desviació a mesura que les notes van sent més agudes. Aquest resultat confirma una pràctica usual en els músics de la cobla que consisteix en forçar l'execució de les notes agudes per tal de donar més èmfasi als passatges més animats de la peça interpretada, normalment compostos de notes altes.

En l'escala normal s'observa una desviació lleugerament superior per a les notes del segon registre que per a les notes del primer. Això és degut a la inharmonicitat que presenten els modes de ressonància de la tenora, i en general de tots els instruments de vent amb un perfil interior de tipus cònic truncat (Benade 1976, Cardona 1980). La freqüència pròpia del segon mode, que és el que controla el règim acústic per a les notes del segon registre, és superior al doble de la corresponent al primer mode. Les escales brillants no mostren tan clarament aquesta diferència perquè l'instrumentista, en forçar l'afinació, tendeix a compensar-la.

Per últim cal esmentar que per a totes les escales algunes notes presenten reiteradament desviacions més altes o més baixes respecte del valor mitjà. Aquest és el cas de les notes Si_2 i Si_3 , les quals tenen tendència a quedar lleugerament baixes. La causa d'aquest comportament es troba en les imperfeccions de col·locació i de dimensionat dels forats corresponents. Un retoc en el disseny de l'instrument, que per al cas de les dues notes esmentades consistiria en augmentar lleugerament el diàmetre dels forats (Cardona 1980), ajudaria a aconseguir una afinació més homogènea.

Les figures 3.6-2, 3.6-3 i 3.6-4 mostren l'evolució temporal de la freqüència del fonamental, expressada en forma de desviació en centèsimes de semitò respecte de l'afinació teòrica normal, per a tres notes aïllades: el Fa_3 , el Sol_3 i el Do_4 . En elles s'observa la fluctuació en freqüència que és característica del vibrat, la qual és de l'ordre de ± 25 centèsimes i es produeix a un ritme de 5 oscil·lacions per segon. La tècnica del vibrat no sols produeix una fluctuació en freqüència, sinó que també comporta una fluctuació en amplitud i en forma d'ona. Es per aquesta raó que apareix un component aleatori en l'evolució temporal de la freqüència ja que la fluctuació de forma d'ona, juntament amb la seva complexitat, fa que l'algorisme d'autocorrelació no determini el període del fonamental en forma suficientment precisa.

La figura 3.6-5 correspon a l'evolució temporal de la freqüència del fonamental pel cas de l'escala brillant-1 pertanyent a la primera sèrie de mesures. L'eix d'ordenades representa la freqüència del fonamental en octaves -escala logarítmica en base 2-, de tal manera que les diferències entre tons corresponen a increments iguals de longitud.

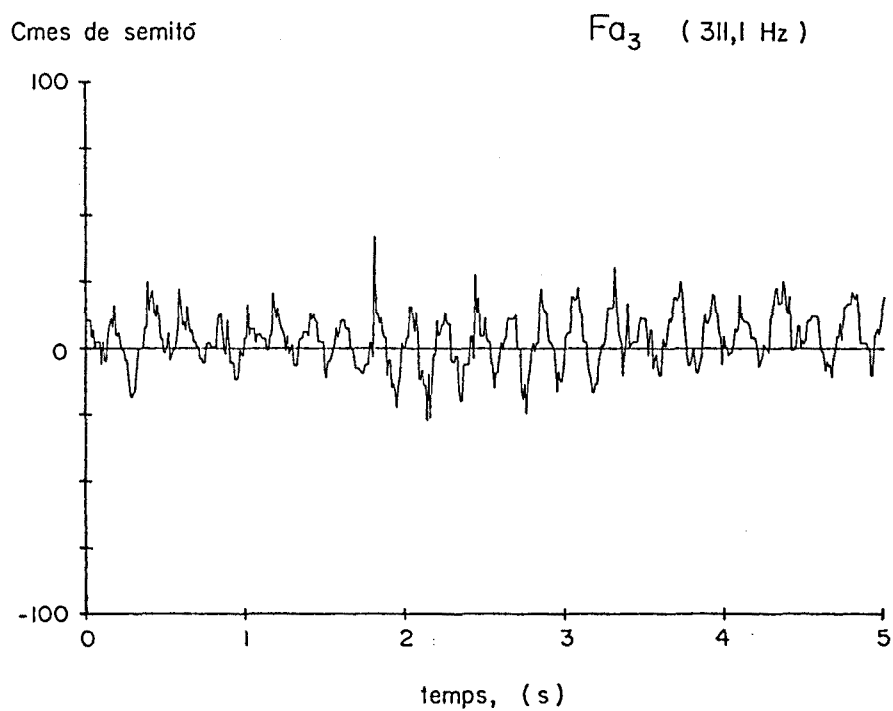


Fig. 3.6-2 Desviació en centèsimes de semit6 respecte de l'afinació teòrica normal per a la nota Fa_3 de la tenora.

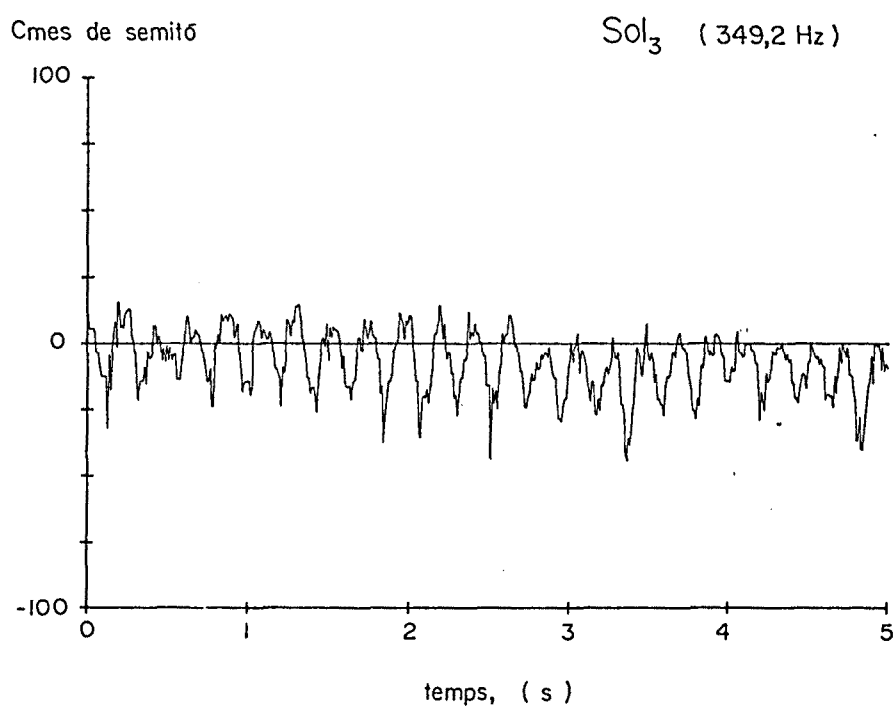


Fig. 3.6-3 Desviació en centèsimes de semit6 respecte de l'afinació teòrica normal per a la nota Sol_3 de la tenora.

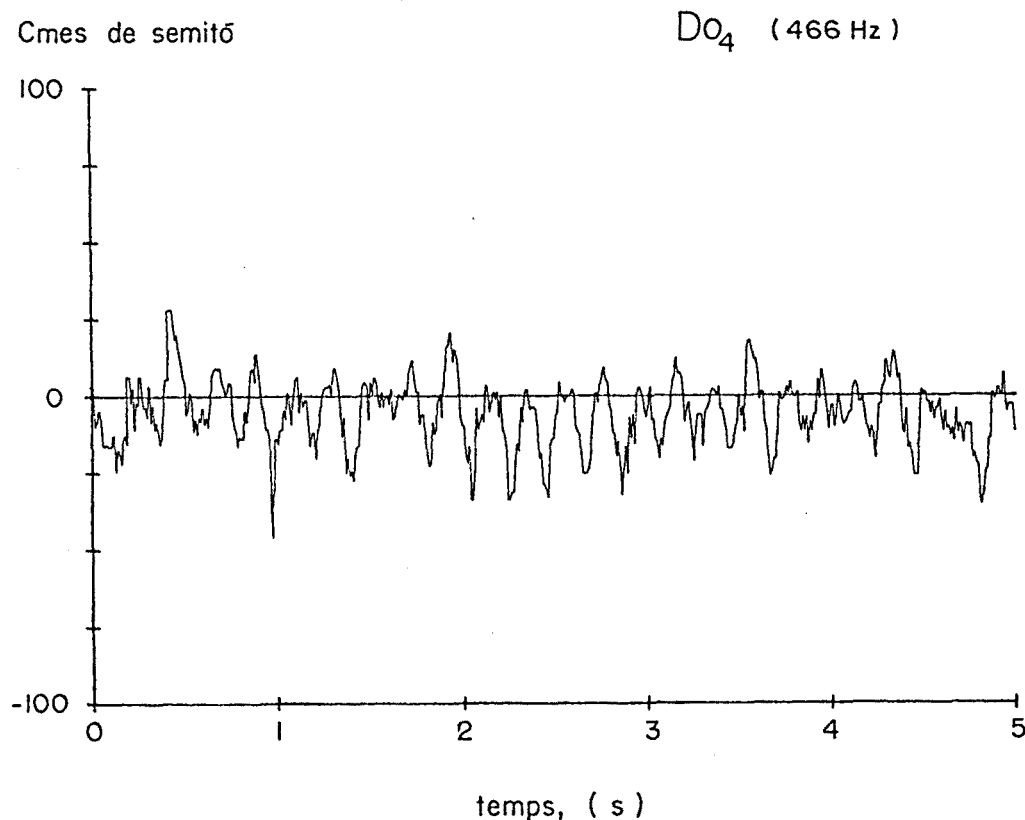


Fig. 3.6-4 Desviació en centèsimes de semit6 respecte de l'afinació teòrica normal per a la nota Do₄ de la tenora.

L'escala fou executada deixant intervals de silenci entre nota i nota, intervals que venen representats a la figura pel valor mínim de l'eix d'ordenades.

El resultat mostra de nou la presència del vibrat, on cal destacar el fet que la fluctuació augmenta a mesura que les notes van sent més agudes. També s'observa com s'estableix ràpidament el règim estacionari per a cada nota, fet que es posa de manifest per l'absència de trams horitzontals associats a transitoris no periòdics. Aixó es deu al tipus d'atac -atac picat- emprat per l'instrumentista, atac que com es va demostrar al capítol 2 és molt ràpid. Aquest resultat contrasta amb l'exposat a la figura 3.5-2 de l'apartat anterior, que corresponia a l'evolució temporal de la freqüència del fonamental per a una escala lligada, sense intervals de silenci entre notes. En aquest cas els atacs eren del tipus bufat, els quals presenten un transitori llarg fins arribar al règim estacionari.

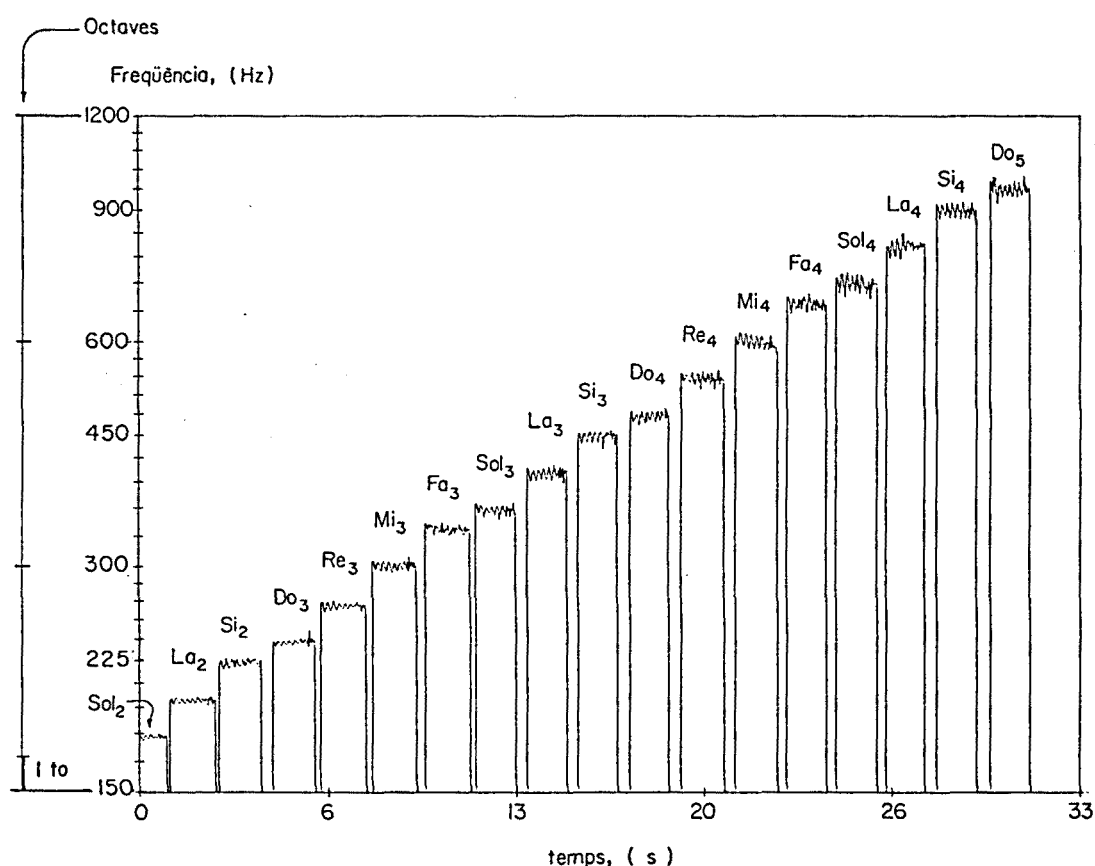


Fig. 3.6-5 Evolució temporal de la freqüència del fonamental per a una escala de tenora -escala brillant 1-.

L'estudi de l'afinació de la tenora es complementa amb l'anàlisi dels espectres del so radiat per l'instrument i de l'ona interna per a diferents notes, tant en diapasó normal com en diapasó brillant. Els resultats s'han obtingut amitjanant 50 espectres corresponents a mostres temporals successives, i emprant una finestra temporal Hanning. L'escala de freqüències és lineal a fi de descriure amb claredat el contingut harmònic i s'esten fins a 12,8 kHz, emprant 800 punts. La resolució freqüencial és per tant de 16 Hz. L'escala vertical també és lineal i representa la magnitud dels harmònics en unitats RMS de pressió.

Les figures de la 3.6-6 a la 3.6-11 mostren els espectres del so radiat per a les notes Sol₃, Si₃ i Re₄, i per ambdós diapasos. S'observa com per a les

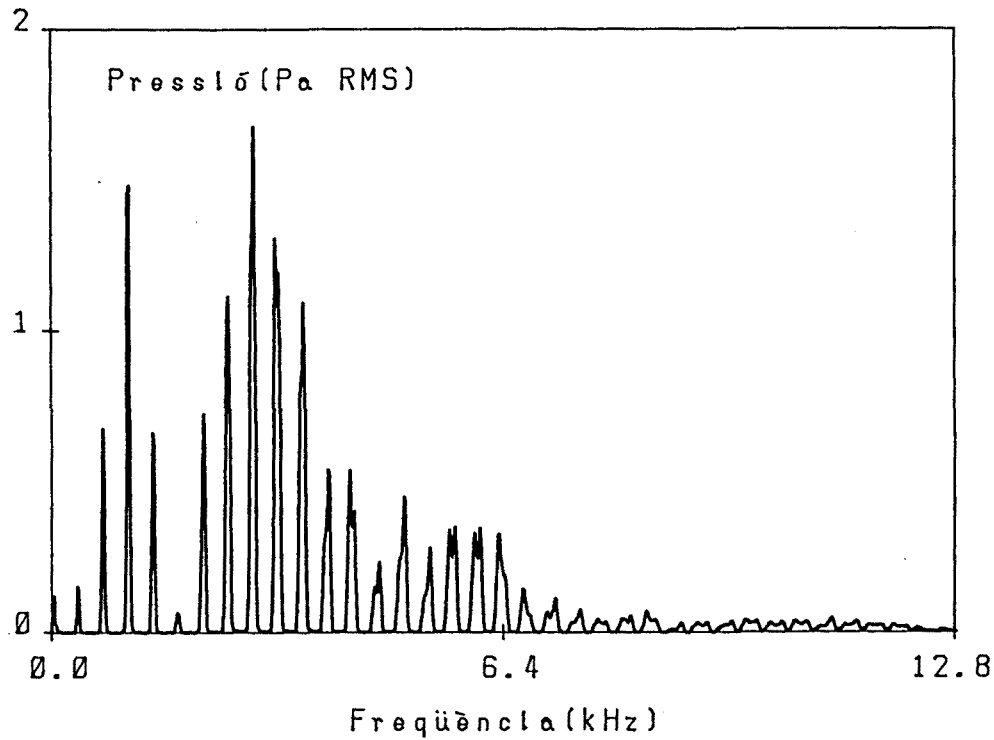


Fig. 3.6-6 Espectre del so radiat per la tenora en executar la nota Sol₃ en diapasó normal.

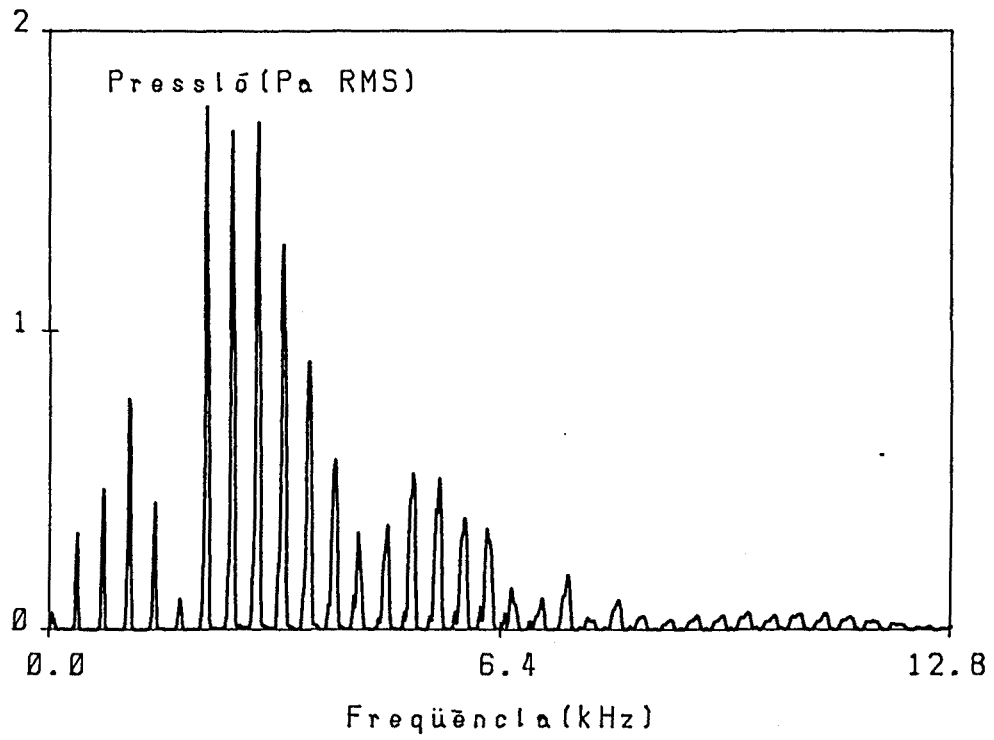


Fig. 3.6-7 Espectre del so radiat per la tenora en executar la nota Sol₃ en diapasó brillant.

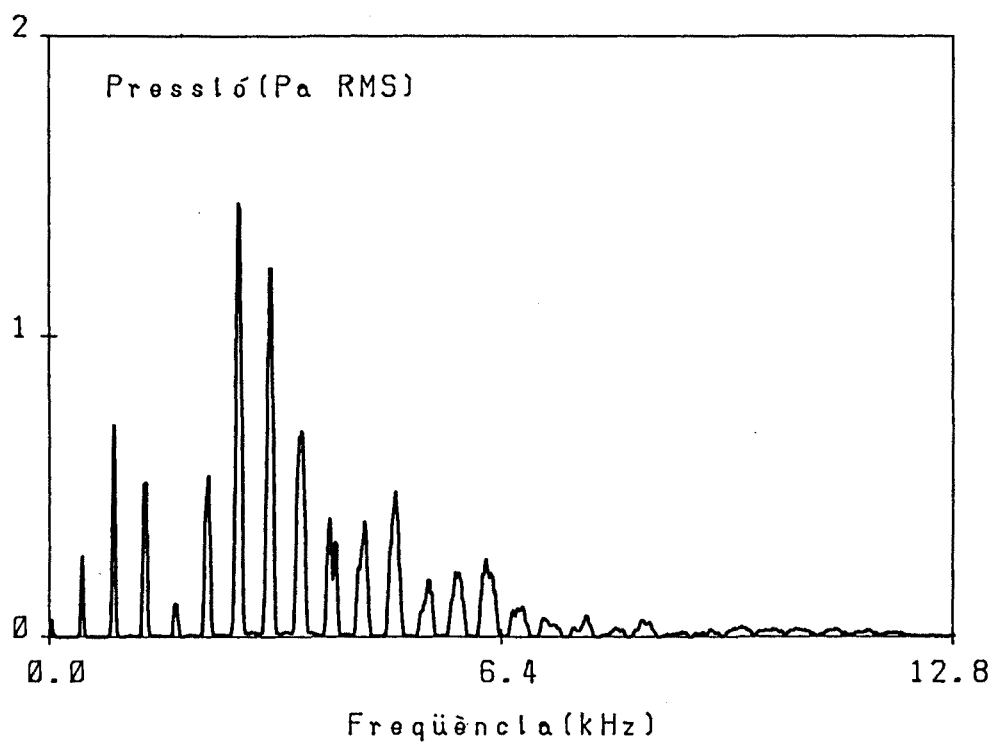


Fig. 3.6-8 Espectre del so radiat per la tenora en executar la nota Si₃ en diapasó normal.

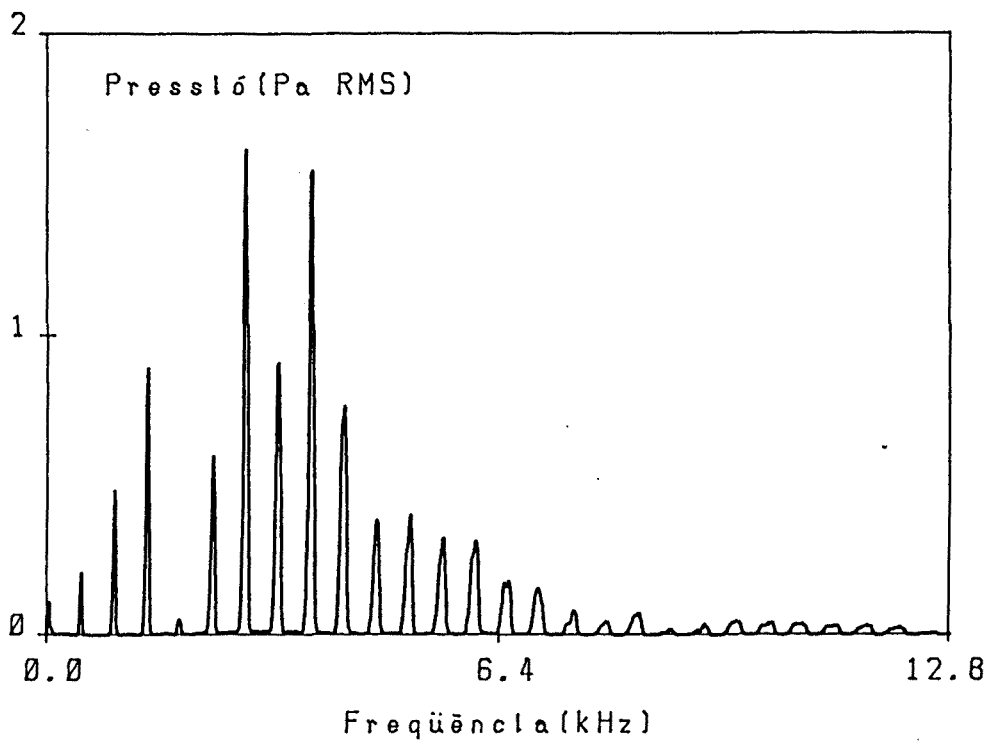


Fig. 3.6-9 Espectre del so radiat per la tenora en executar la nota Si₃ en diapasó brillant.

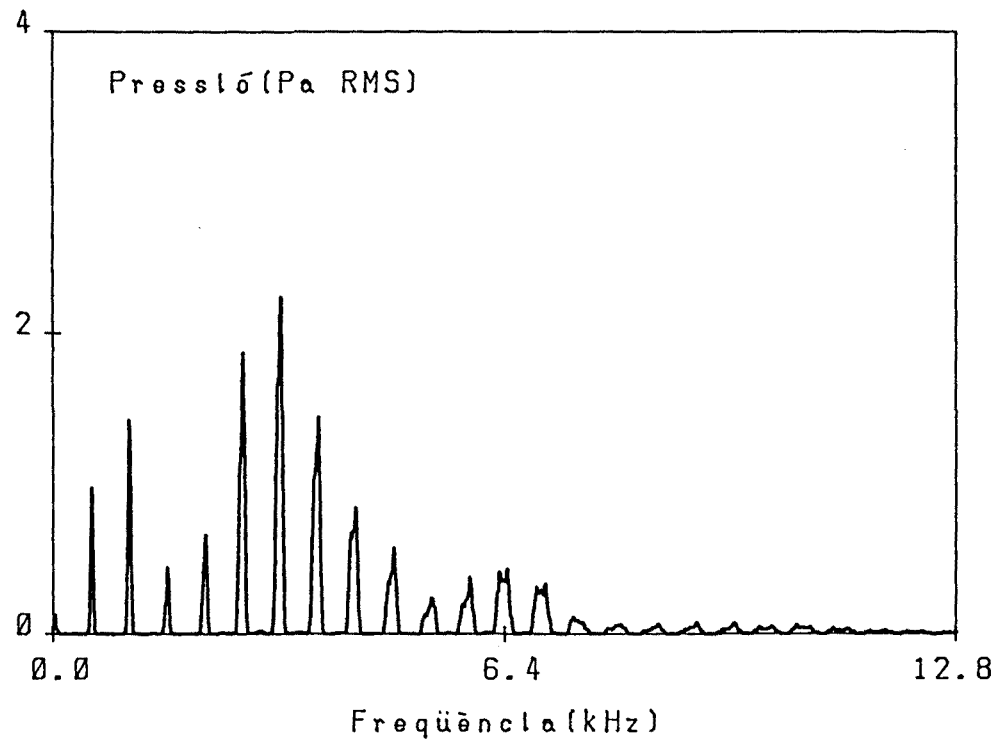


Fig. 3.6-10 Espectre del so radiat per la tenora en executar la nota Re_4 en diapasó normal.

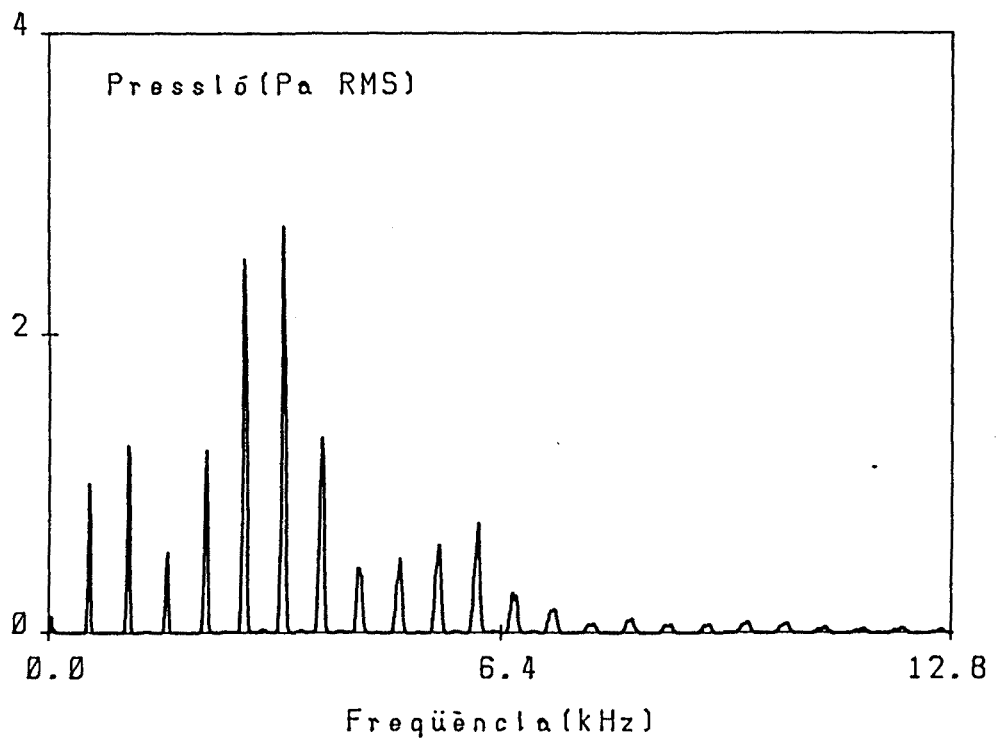


Fig. 3.6-11 Espectre del so radiat per la tenora en executar la nota Re_4 en diapasó brillant.

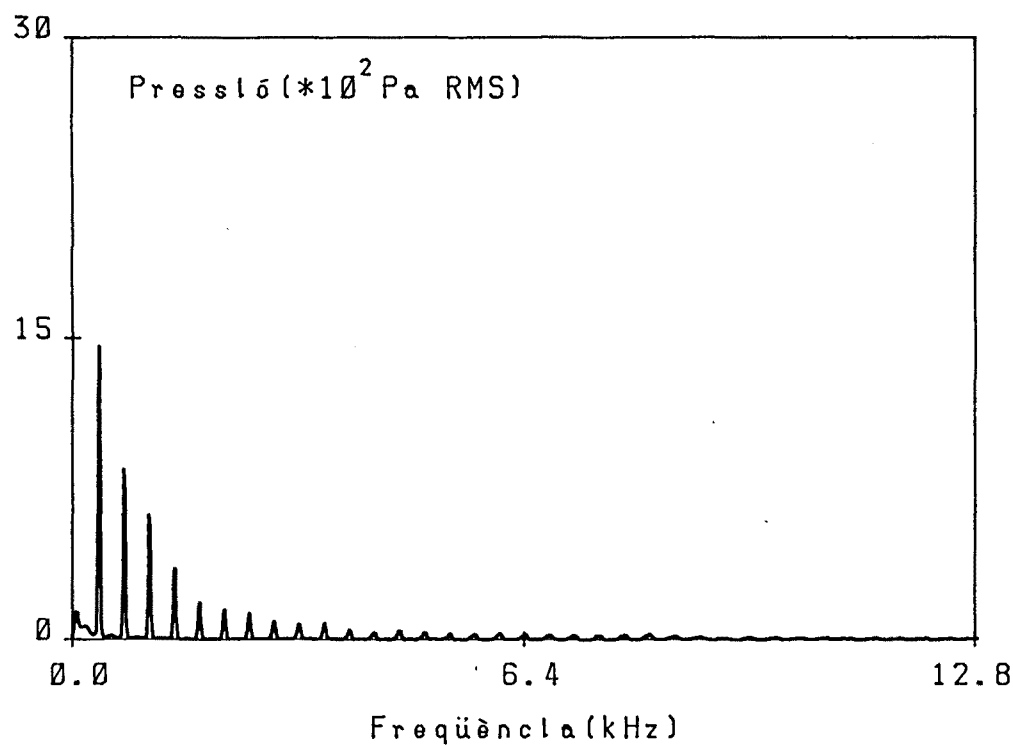


Fig. 3.6-12 Espectre de l'ona interna de la nota Sol₃ de la tenora en diapasó normal.

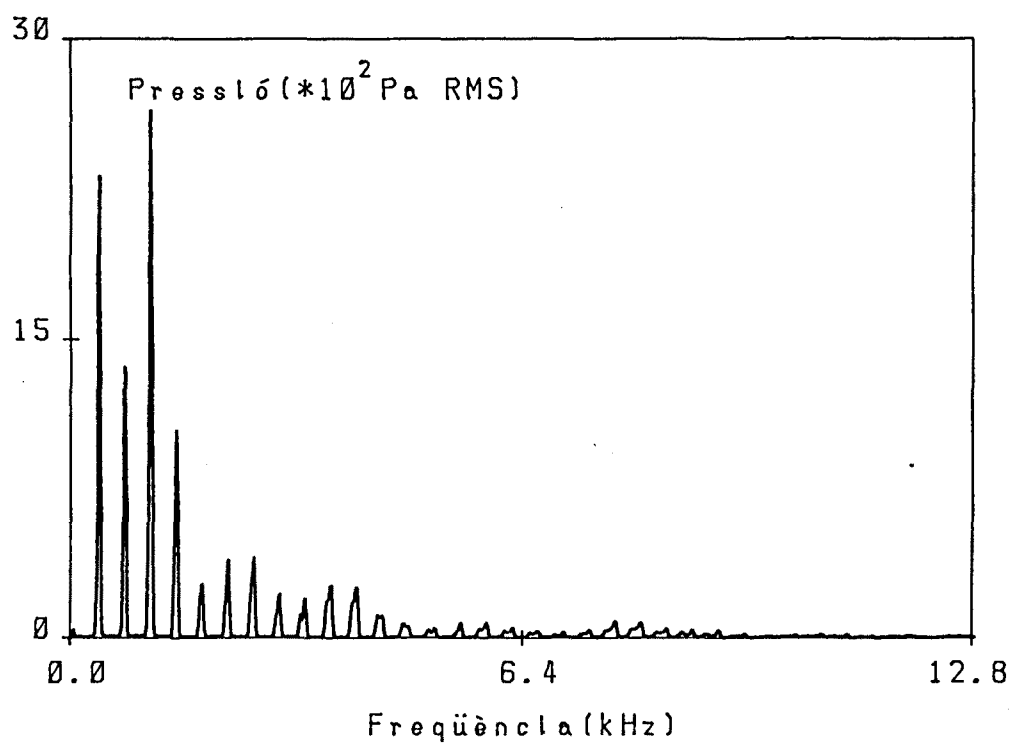


Fig. 3.6-13 Espectre de l'ona interna de la nota Sol₃ de la tenora en diapasó brillant.

notes en brillant el contingut en harmònics d'alta freqüència és més important. Això implica un color tímbric més estrident i viu, molt apte per interpretar música de dansa a l'aire lliure. Es per aquesta raó que el color tímbric associat al diapasó brillant es considera com el característic de la tenora i que aquest diapasó s'hagi consolidat a la major part de cobles.

L'aparició d'harmònics d'alta freqüència s'atribueix tant a la variació de les condicions de funcionament del mecanisme d'autoexcitació com a la utilització d'un tudell més curt. Al capítol 6, on s'estudia el mecanisme d'autoexcitació i la seva relació amb l'espontaneïtat, s'analitza aquest fet en detall.

A totes les figures s'observa com a mesura que augmenta el número d'ordre dels harmònics, els pics corresponents s'eixamplen per causa de la fluctuació de freqüència introduïda pel vibrat, i de l'omitjanament d'espectres. La fluctuació és més important, en valor absolut, per als harmònics més alts i aquest fet es reflecteix a l'hora d'obtenir l'espectre omitjanat.

Les figures 3.6-12 i 3.6-13 mostren els espectres de l'ona interna per a la nota Sol₃ i per ambdós diapasos. Els espectres s'han obtingut en forma anàloga a com s'han obtingut els espectres del so radiat, però emprant el micròfon de 1/8 de polçada inserit en el tudell, ja utilitzat en l'enregistrament dels atacs. S'observa com en el cas del diapasó brillant els harmònics 3^{er} i 4^{rt} són més intensos que en el cas del diapasó normal. També es comprova com a partir de la freqüència de tall de l'instrument -1,2 kHz- situada entre el 3^{er} i 4^{rt} harmònic, el contingut espectral és ja molt menys intens.

Comparant els dos espectres amb els espectres de l'ona radiada per a la mateixa nota es fa palesa la seva complementarietat. Els harmònics situats per sota de la freqüència de tall són en gran part reflectits tant als forats oberts com al pavelló, i són per tant els responsables del govern del moviment de la canya. D'ells en depèn en gran manera l'espontaneïtat de l'instrument. Per contra els harmònics situats per sobre de la freqüència de tall són radiats pràcticament en la seva totalitat i són els responsables del color tímbric de l'instrument. Aquest fet ja fou comprovat a la tesi de S. Cardona, i es presenta en tots els instruments musicals de vent (Cardona 1980).

L'afinació del tible.

S'han efectuat mesures d'afinació comptant amb la col.laboració dels dos instrumentistes que ja col.laboraren en l'estudi dels atacs, cadascun d'ells amb el seu propi instrument. Els dos tibles provenen del mateix constructor: en Pardo, de la Bisbal. Les mesures, anàlogament que en cas de la tenora, s'expressen en forma de desviació en centèsimes de semitó respecte de l'afinació de l'escala temperada normal -mostrada al capítol 1, taula 1.1-II -.

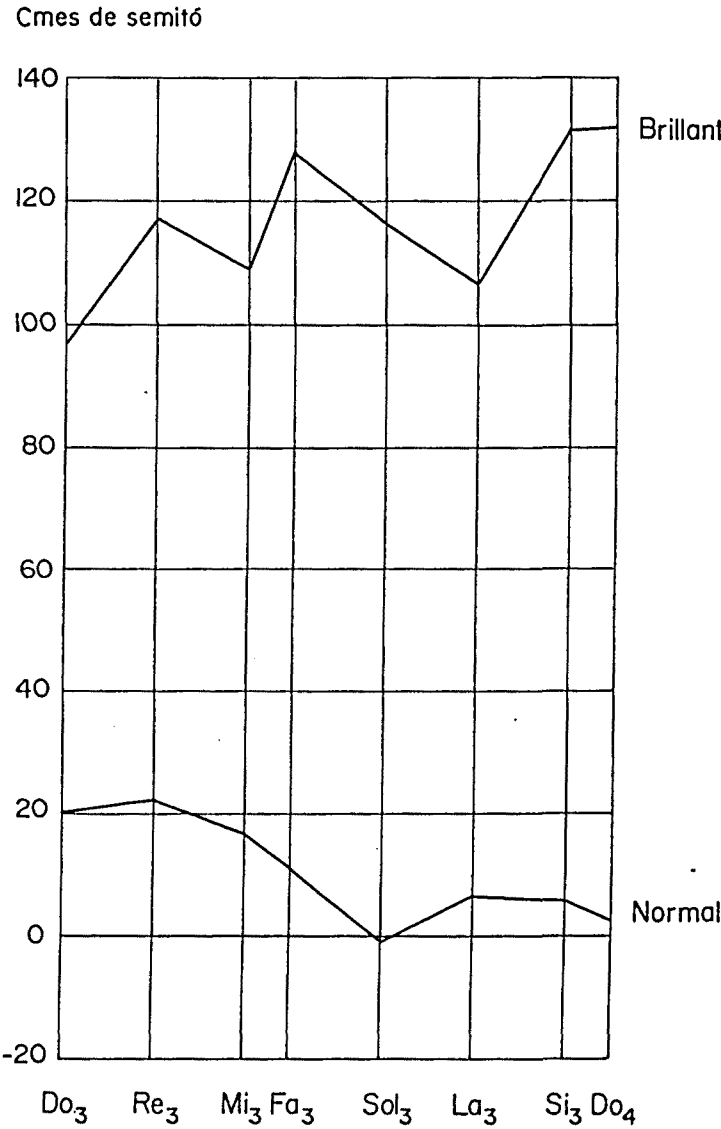


Fig. 3.6-14 Resultats d'afinació obtinguts amb un tible Pardo en executar escales en tonalitat de Do Major.

La figura 3.6-14 recull els resultats per al primer dels instruments que corresponen a dues escales en Do Major d'una octava d'extensió i compreses dins del primer registre -del Do_3 al Do_4 -. La primera escala fou executada sense forçar l'afinació i, tal com s'observa a la figura, la desviació màxima no supera les 22 centèsimes. Es pot considerar per tant que és una escala executada en diapasó normal. La segona escala fou executada forçant al màxim l'afinació per tal d'obtenir un diapasó més alt. S'observa com la diferència entre ambdues escales és de l'ordre d'un semitó, és a dir que la segona escala correspon a un diapasó brillant força accentuat.

Això demostra que el tible, sense necessitat d'un canvi de tudell, permet ajustar el diapasó dins uns marges més amplis que els permesos per la tenora. Aquest comportament prové del fet de ser el tible un instrument més curt que la tenora, i tenir per tant una tessitura més aguda -sona una quinta més alt que la tenora-. Com a conseqüència els períodes de les notes són més petits i la variació del retard introduït pel mecanisme d'autoexcitació té una incidència més acusada en la variació de l'afinació.

La figura 3.6-15 mostra els resultats obtinguts per al segon tible. Els resultats corresponen a l'afinació de quatre escales diferents: Dues escales en La menor, també d'una octava d'extensió i compreses dins del primer registre -del La_2 al La_3 -, les quals foren executades en dies diferents. I dues escales cromàtiques; la primera des del La_2 fins al La_3 , dins del primer registre, i la segona des del La_3 al La_4 , que s'esten fins al segon registre.

Entre ambdues escales diatòniques hi ha una diferència mitjana de 20 centèsimes, trobant-se en un diapasó intermedi entre el normal i el brillant. S'observa com algunes notes presenten desviacions més acusades respecte de les restants. Així el Si_2 està lleugerament alt mentre el Do_3 queda una mica baix. Un retoc en els forats corresponents facilitaria l'execució musical pel que fa a l'afinació.

Les escales cromàtiques mostren una dispersió més gran en les desviacions per causa de la dificultat que comporta executar una escala afinant de semitó en semitó. La segona escala cromàtica parteix d'un diapasó més alt que el de la primera i les desviacions augmenten a mesura que les notes van sent més agudes. Igual que en la tenora, l'instrumentista puja

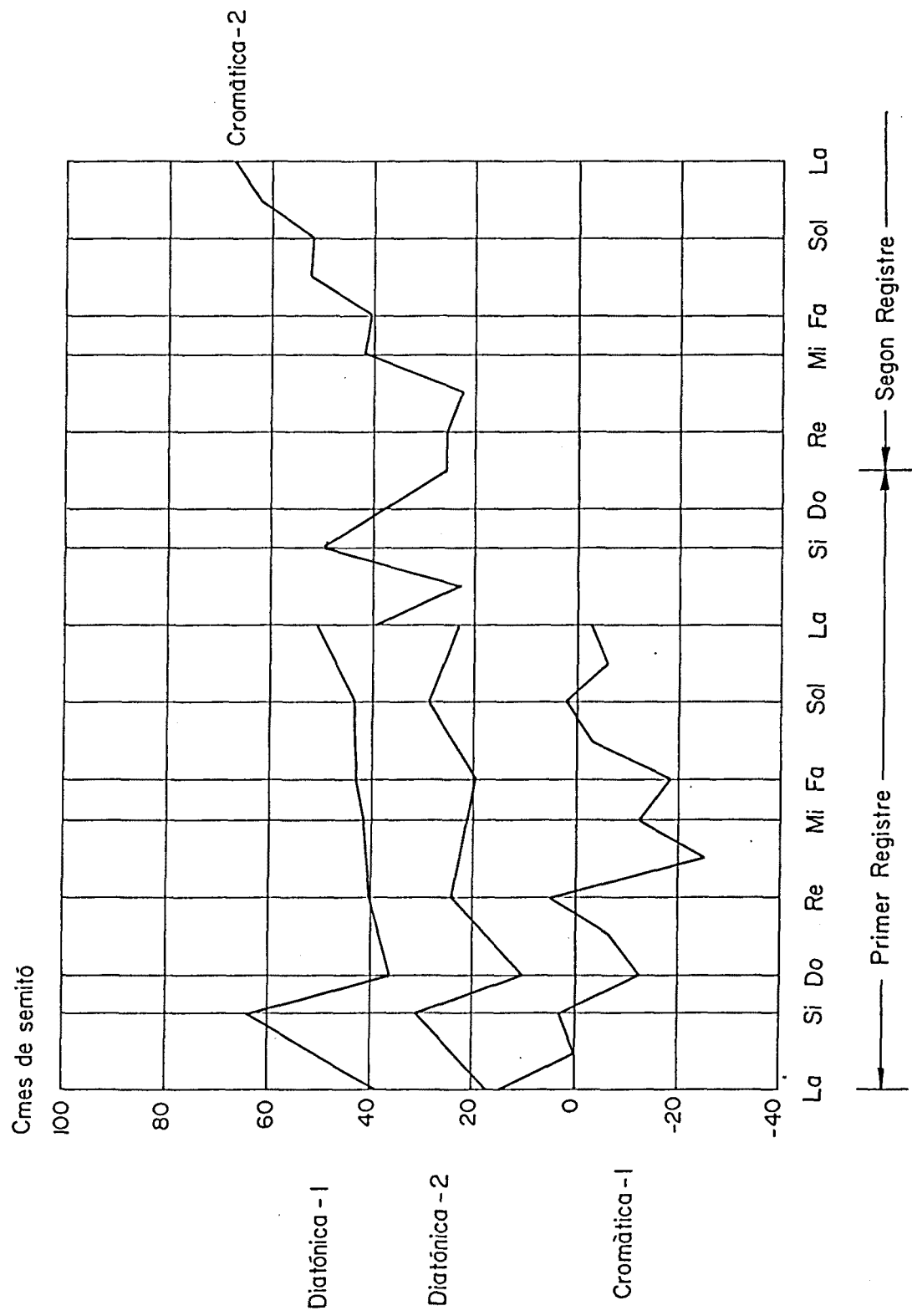


Fig. 3.6-15 Resultats d'afinació obtinguts amb un tible Pardo en executar diferents escales musicals.

l'afinació d'aquestes notes per tal de donar-les-hi un caràcter més viu.

La figura 3.6-16 mostra l'evolució temporal de la freqüència del fonamental per a la primera escala diatònica, des del La_2 fins al Sol_3 . S'observa, a l'igual que en la tenora, un vibrat més intens per a les notes més agudes.

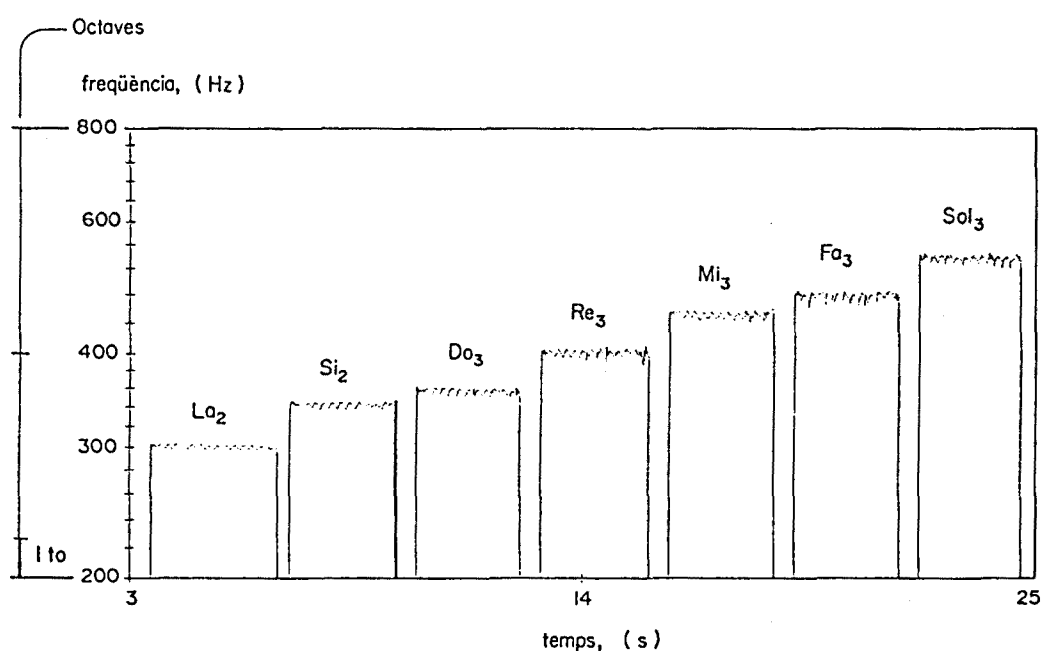


Fig. 3.6-16 Evolució temporal de la freqüència del fonamental per a una escala de tible. Escala diatònica del La_2 al Sol_3 .

Finalment es mostren els espectres de l'ona radiada i de l'ona interna per a les notes La_2 , Mi_3 i Mi_4 respectivament -figures de la 3.6-17 a la 3.6-22-. L'anàlisi d'aquests espectres porta a unes conclusions anàlegues a les fetes per a la tenora: Complementarietat dels espectres de l'ona interna i de l'ona radiada per a cada nota, i eixamplament dels pics corresponents als harmònics alts per causa del vibrat.

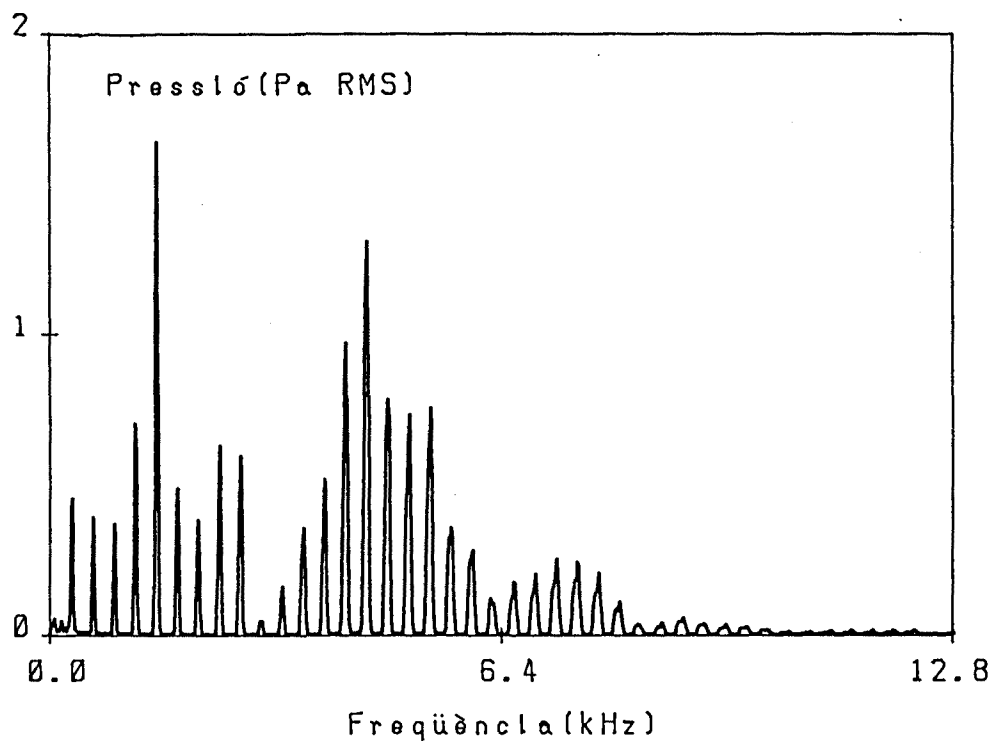


Fig. 3.6-17 Espectre del so radiat pel tible en executar la nota La₂.

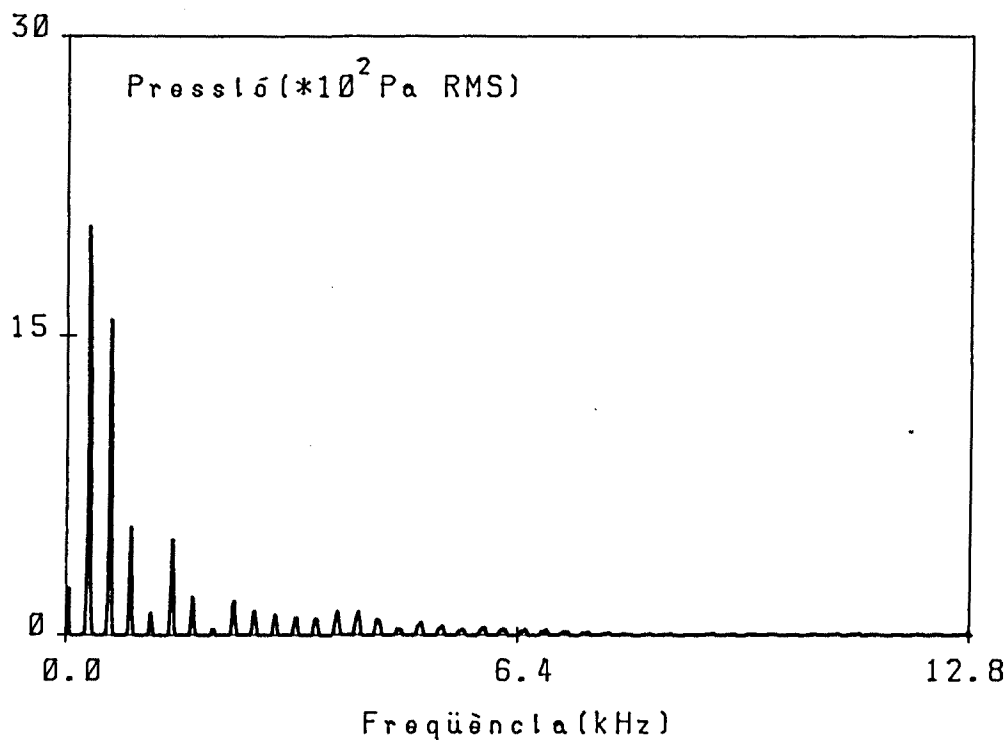


Fig. 3.6-18 Espectre de l'ona interna de la nota La₂ del tible.

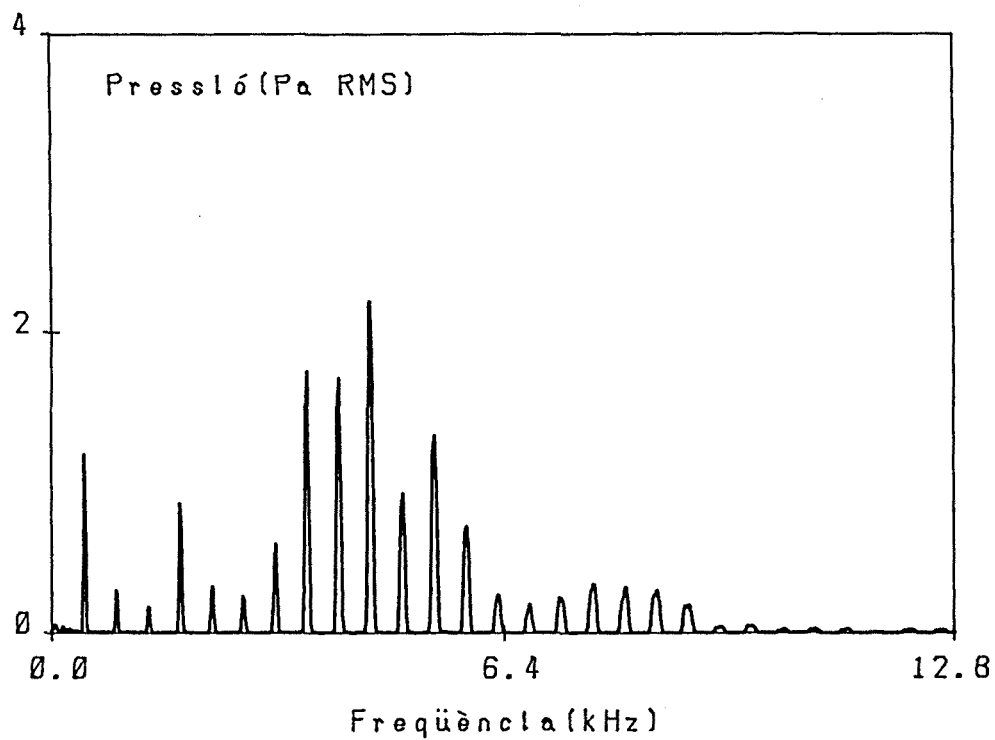


Fig. 3.6-19 Espectre del so radiat pel tible en executar la nota Mi_3 .

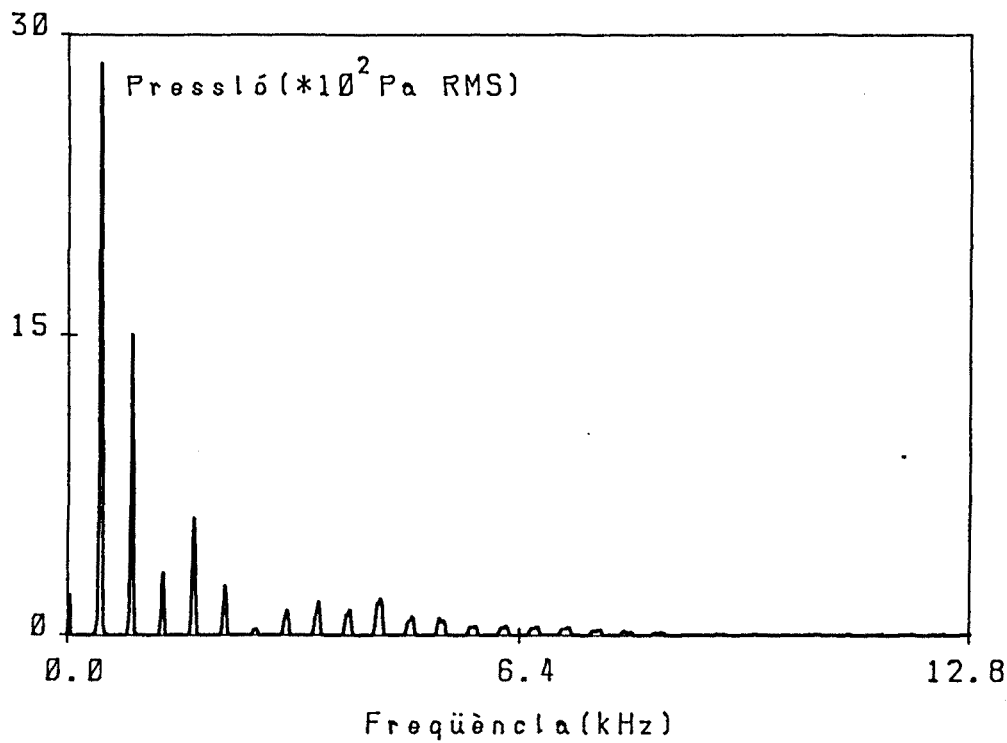


Fig. 3.6-20 Espectre de l'ona interna de la nota Mi_3 del tible.

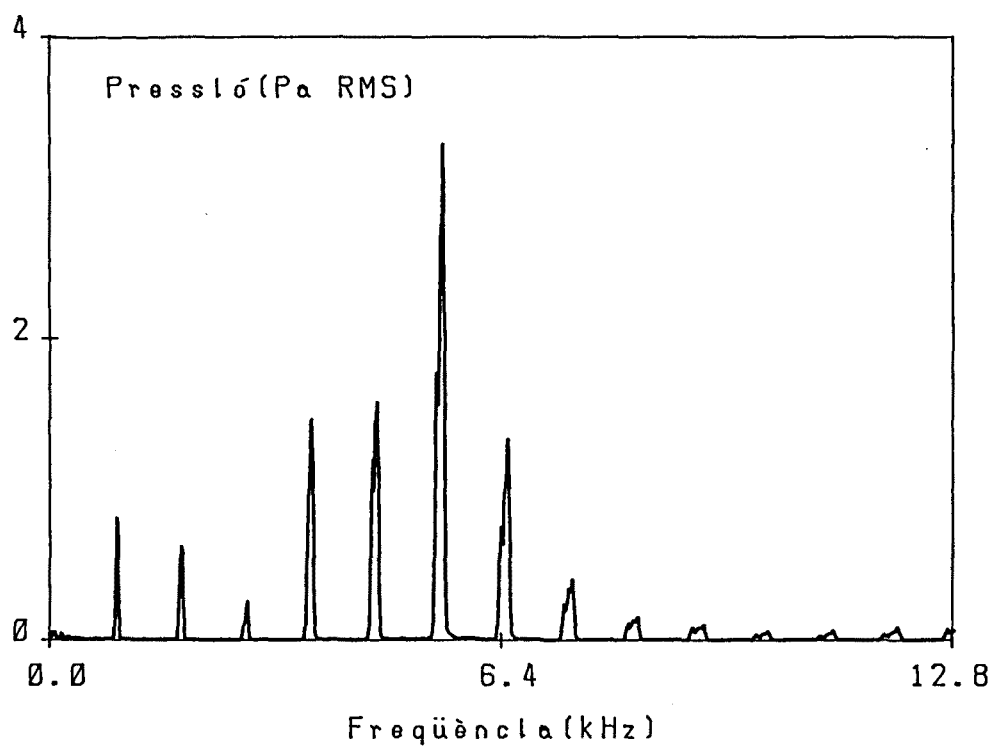


Fig. 3.6-21 Espectre del so radiat pel tible en executar la nota Mi_4 .

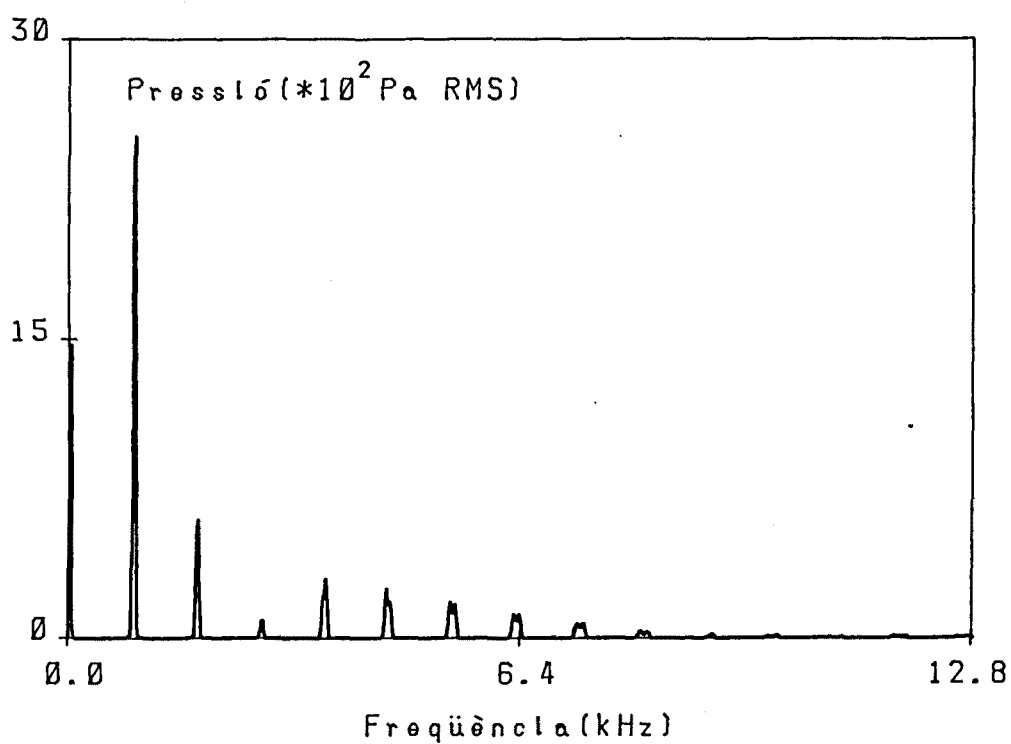


Fig. 3.6-22 Espectre de l'ona interna de la nota Mi_4 del tible.

L'afinació de la dolçaina del País Valencià.

La dolçaina és un instrument de vent de perfil interior cònic usualment emprat al País Valencià en cercaviles i balls populars a l'aire lliure. El seu aspecte és semblant al d'un tible però amb les següents diferències:

- . Està format per un sol cos de fusta que sol ser generalment de boix, o més rarament de palissandre o banús, i no empra claus.
- . Es més curta que un tible -entre 25 i 40 cm.- i té un pavelló més petit.
- . Empra un tudell anàleg al del tible i la tenora, però les canyes són més gruixudes i rígides, rao per la qual el seu so és més ric en harmònics alts i per tant més estrident. Aquesta característica fa que sigui un instrument molt apte per a interpretar a l'aire lliure música popular de caire festiu.

S'han realitzat mesures d'afinació emprant quatre dolçaines diferents encara que provinents d'un mateix constructor -radicat a Morella, a la comarca dels Ports a Castelló-. Tres dolçaines són del tipus llarg, afinades en Fa, i construïdes amb fusta de boix, palissandre i banús respectivament. La darrera és una dolçaina curta, afinada en Sol, i construïda amb fusta de boix.

La figura 3.6-23 mostra la desviació, en centèsimes de semitó respecte de l'afinació temperada normal, de quatre escales cromàtiques interpretades pel mateix instrumentista emprant cadascuna de les dolçaines abans esmentades.

Destaca en primer lloc la gran dispersió que presenten les desviacions si es compara amb les obtingudes per al tible i la tenora. Aquesta dispersió arriba a ser quasi d'un to sencer per al cas de la dolçaina llarga de palissandre. La causa de tal resultat cal cercar-la en el tipus de construcció totalment artesanal d'aquests instruments i en l'escassa exigència, pel que fa a l'afinació, a que estan sotmesos. Per aquesta raó la dolçaina no s'ha perfeccionat al llarg del temps i les imperfeccions en el seu disseny, principalment les associades a la col·locació i a les dimensions dels forats, no s'han eliminat. També s'observa com totes les dolçaines presenten diapasons força diferents. El fet que siguin instruments no inclosos dins conjunts instrumentals fa que no s'hagi establert amb precisió un diapasó únic i característic per a tots ells.

Cmes de semit6

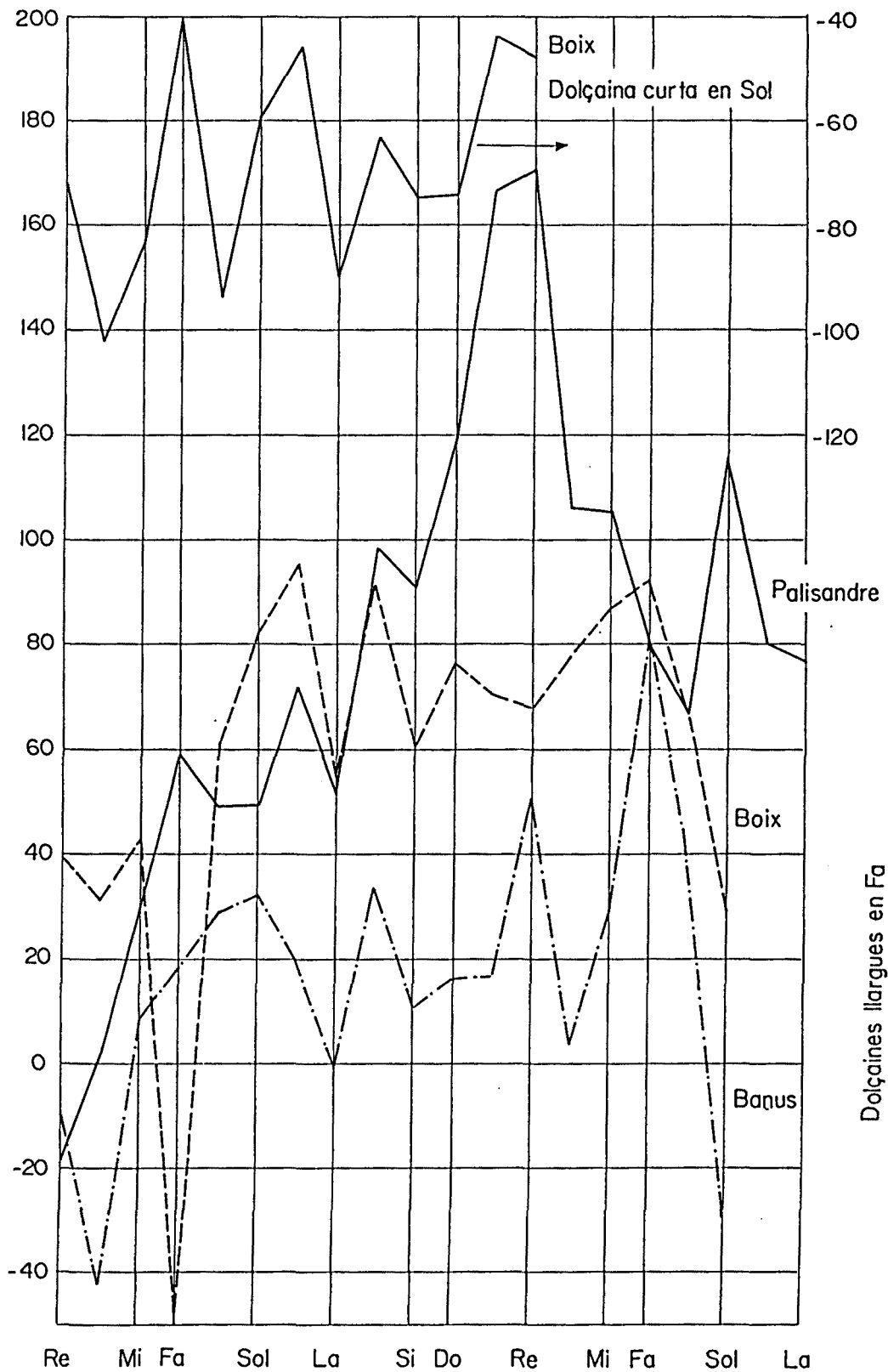


Fig. 3.6-23 Resultats d'afinació per a diferents tipus de dolçaines.

3.7. CONCLUSIONS DELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

L'anàlisi dels resultats experimentals exposats a l'apartat anterior condueix a les següents conclusions:

El canvi de tudell emprat a la tenora per passar de diapasó normal a diapasó brillant és insuficient. L'instrumentista, gràcies a l'ampli camp de llibertat en l'afinació que permet la tenora, pot ajustar l'afinació fins aconseguir el diapasó desitjat. Per la mateixa raó, la intencionalitat del músic a l'hora de donar caràcter a la peça interpretada es tradueix en variacions notables en l'afinació.

El vibrat presenta una fluctuació en freqüència de l'ordre de ± 25 centèsimes de semitó per a les notes de la zona central de la seva tessitura, i augmenta a mesura que les notes són més agudes. El vibrat es produeix a un ritme d'aproximadament 5 fluctuacions per segon.

El diapasó brillant no es caracteritza solament per ser més agut que el normal, sinó que també comporta un contingut més gran d'harmònics elevats. El seu color tímbric és per tant més viu.

El tible presenta un camp de llibertat en l'afinació més ampli que el de la tenora, per la qual cosa no requereix canviar el tudell per passar d'un diapasó a l'altre. El vibrat presenta les mateixes característiques que el de la tenora.

Per últim les dolçaines del País Valencià presenten un desafinament notable i no mostren un diapasó definit. Les mesures realitzades, malgrat constituir només un estudi introductori d'aquests instruments, demostren la seva necessitat de perfeccionament.

4. DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA RESPOSTA IMPULSIONAL.

4.1. PLANTEJAMENT I OBJECTIUS.

4.2. EL MUNTATGE EXPERIMENTAL.

4.3. CALIBRACIÓ DE LA RESPOSTA IMPULSIONAL.

4.4. ELS RESULTATS EXPERIMENTALS. PRESENTACIÓ I ANÀLISI.

. Les respostes impulsional de la tenora.

. Les respostes impulsional del tible.

4.5. CONCLUSIONS DELS RESULTATS EXPERIMENTALS.

4. DETERMINACIÓ EXPERIMENTAL DE LA RESPOSTA IMPULSIONAL.

4.1. PLANTEJAMENT I OBJECTIUS.

La resposta impulsional és la resposta d'un sistema a un impuls inicial d'excitació unitari, i caracteritza totalment el comportament dinàmic del sistema, si aquest és lineal.

En el cas del sistema format per la columna d'aire a l'interior d'un instrument musical de vent, s'accepta que el seu comportament és lineal i s'acostuma escollir la pressió com a variable representativa de la resposta i un impuls unitari de velocitat com a excitació.

Tant resposta com excitació poden ser localitzades en la mateixa secció o en seccions diferents; però per a l'estudi de l'espontaneïtat, així com per a l'estudi del mecanisme d'autoexcitació que s'estableix entre la canya i la columna d'aire, interessa conèixer la resposta impulsional definida entre la pressió i la velocitat ambdues localitzades a la secció d'entrada on es situa la canya.

La resposta a una excitació arbitrària de velocitat s'obté per mitjà del producte de convolució

$$p(t) = h(t) * v(t) = \int_0^t h(\tau) v(t-\tau) d\tau \quad , \quad (4.1.1)$$

on $h(t)$ és la funció resposta impulsional i $p(t)$ i $v(t)$ són respectivament les funcions temporals representatives de la pressió i de la velocitat.

Paral·lelament a la resposta impulsional es defineix la resposta freqüencial que també caracteritza el comportament dinàmic d'un sistema lineal. La resposta freqüencial és la resposta del sistema a una excitació harmònica. Pel fet de ser lineal, la resposta també serà harmònica i de la mateixa freqüència que l'excitació.

Anàlogament al cas de la resposta impulsional, s'acostuma emprar com a resposta freqüencial de la columna d'aire la que relaciona pressió i velocitat a la secció d'entrada de l'instrument, definides ambdues mitjançant variables complexes funció de la freqüència

$$Z(f) = \hat{p}(f) / \hat{v}(f) \quad . \quad (4.1.2)$$

Aquesta resposta s'anomena *impedància acústica específica* de la secció. També es sol emprar la *impedància acústica analògica*, que relaciona la pressió amb el cabal volumètric

$$Z_{an}(f) = Z / S \quad , \quad (4.1.3)$$

essent S l'àrea de la secció d'entrada.

En el context d'aquest treball, en referir-se simplement a impedància acústica es sobreentendrà que es tracta de la impedància acústica específica.

La impedància acústica es relaciona amb la resposta impulsional per mitjà de la Transformada de Fourier d'acord amb

$$Z(f) = TF[h(t)] \quad h(t) = TF^{-1}[Z(f)] \quad . \quad (4.1.4)$$

L'ús d'una o altra forma de caracteritzar l'instrument depèn de l'àmbit d'estudi escollit.

La impedància acústica és més simple d'obtenir per càlcul i proporciona una descripció directa del règim estacionari i del comportament modal del sistema, que es correlaciona amb facilitat amb aspectes del funcionament dels instruments com ara l'acció dels forats de registre o l'efecte del pavelló (Cardona 1980, Benade 1976).

La resposta impulsional no obstant és més adequada a l'hora d'estudiar aspectes del comportament acústic que queden millor descrits en el camp temporal. Així en la resposta impulsional s'observen directament les reflexions

que tenen lloc en les diferents discontinuïtats del perfil interior de l'instrument , i que juguen un paper fonamental en l'espontaneïtat.

Pel que fa a la determinació experimental de la impedància acústica, és freqüent que només es determini en mòdul a causa de les dificultats que presenta la determinació de la fase. La necessitat d'emprar una doble cadena de mesura, la de la pressió i la de la velocitat, pot introduir errors si no es té un coneixement acurat de la fase introduïda per cada cadena. Per altra banda la mesura experimental de la velocitat presenta més dificultats que la de la pressió.

Una tècnica normalment emprada per a determinar el mòdul de $Z(f)$ és l'excitació a través d'un tub capil·lar, tècnica que no requereix la mesura directa de la velocitat (Agulló 1985). Però per conèixer la fase cal recórrer a càlculs complexos que tenen en compte la dinàmica del capil·lar. Per a les freqüències dels primers modes de ressonància l'anàlisi modal permet fer una estimació de l'angle de fase per càlcul.

La determinació experimental directa de la resposta impulsional no presenta els problemes relacionats amb la fase i requereix un temps d'experimentació més curt. La tècnica emprada consisteix en produir un impuls de cabal, i com a conseqüència un impuls de velocitat, just a la secció d'entrada de l'instrument. Si la durada de l'impuls és prou curta, es pot considerar que l'evolució temporal de la pressió a la mateixa secció d'entrada és proporcional a la resposta impulsional.

El procés que té lloc a l'interior de l'instrument com a conseqüència de la introducció de l'impuls de cabal es descriu a continuació: La introducció de l'impuls genera una ona que es propaga al llarg del tub de l'instrument. Quan l'ona arriba a la primera discontinuïtat que presenta el perfil interior de l'instrument -que pot ser un canvi de diàmetre, un canvi de conicitat, la presència d'un forat lateral o bé l'extrem obert de la secció de sortida- es descompon en dos. Una ona es reflecteix i es propaga en direcció oposada -l'ona reflectida- mentre l'altra continua propagant-se en el mateix sentit -l'ona transmesa-. Ambdues ones incideixen aleshores en altres discontinuïtats i apareix així un seguit d'ones reflectides i ones transmeses que es propaguen al llarg de l'instrument en els dos sentits. L'esmoreïment intern i la radiació

acústica a través dels forats oberts i de l'extrem obert dissipen energia del sistema, i com a conseqüència les ones s'atenuen i es retarden. L'evolució temporal de la pressió a la secció d'entrada, causada per l'arribada a aquesta secció de successives ones reflectides, determina la forma de la resposta impulsional.

La figura 4.1-1 il·lustra la formació de la resposta impulsional per al cas d'un tub cilíndric obert a l'extrem de sortida. La introducció de l'impuls de cabal genera un impuls inicial de pressió que es propaga cap a l'extrem obert. A mesura que avança, l'esmoreïment n'atenua alçada i en modifica la forma. En arribar a l'extrem obert, l'ona es reflecteix invertint-se i perdent energia per causa de la radiació a l'extrem. La reflexió es propaga ara cap a l'extrem d'entrada, extrem que degut a la definició de la resposta impulsional es troba tancat, on es reflecteix de nou en aquesta ocasió sense invertir-se. I així successivament fins a la desaparició total de les reflexions per causa de la dissipació d'energia.

La relació entre la resposta impulsional i l'espontaneïtat de l'instrument rau en el fet que de la magnitud i de la forma de les reflexions que arriben a la canya en depèn el funcionament del mecanisme d'autoexcitació i per tant el que s'assoleixi un règim acústic estable.

Amb la tècnica experimental que es presenta en aquest capítol s'han obtingut les respostes impulsional per a diverses notes de diferents tibles i tenores. Els resultats es contrasten amb les respostes impulsional obtingudes per càlcul. En el capítol 6 es relacionaran les respostes impulsional amb els atacs, obtinguts mitjançant la tècnica presentada al capítol 2, a efectes d'analitzar el comportament del instruments pel que fa a la seva espontaneïtat.

4.2. EL MUNTATGE EXPERIMENTAL.

La tècnica experimental més directa per obtenir la resposta impulsional es basa en la producció d'un impuls de cabal a la secció d'entrada de l'instrument. Aquest impuls pot produir-se per mitjà, com ara, d'una descàrrega elèctrica entre dos electrodes -és el mètode emprat en aquesta tesi (Martínez 1985)- o del moviment brusc d'un element piezoelèctric sotmès a un impuls de tensió

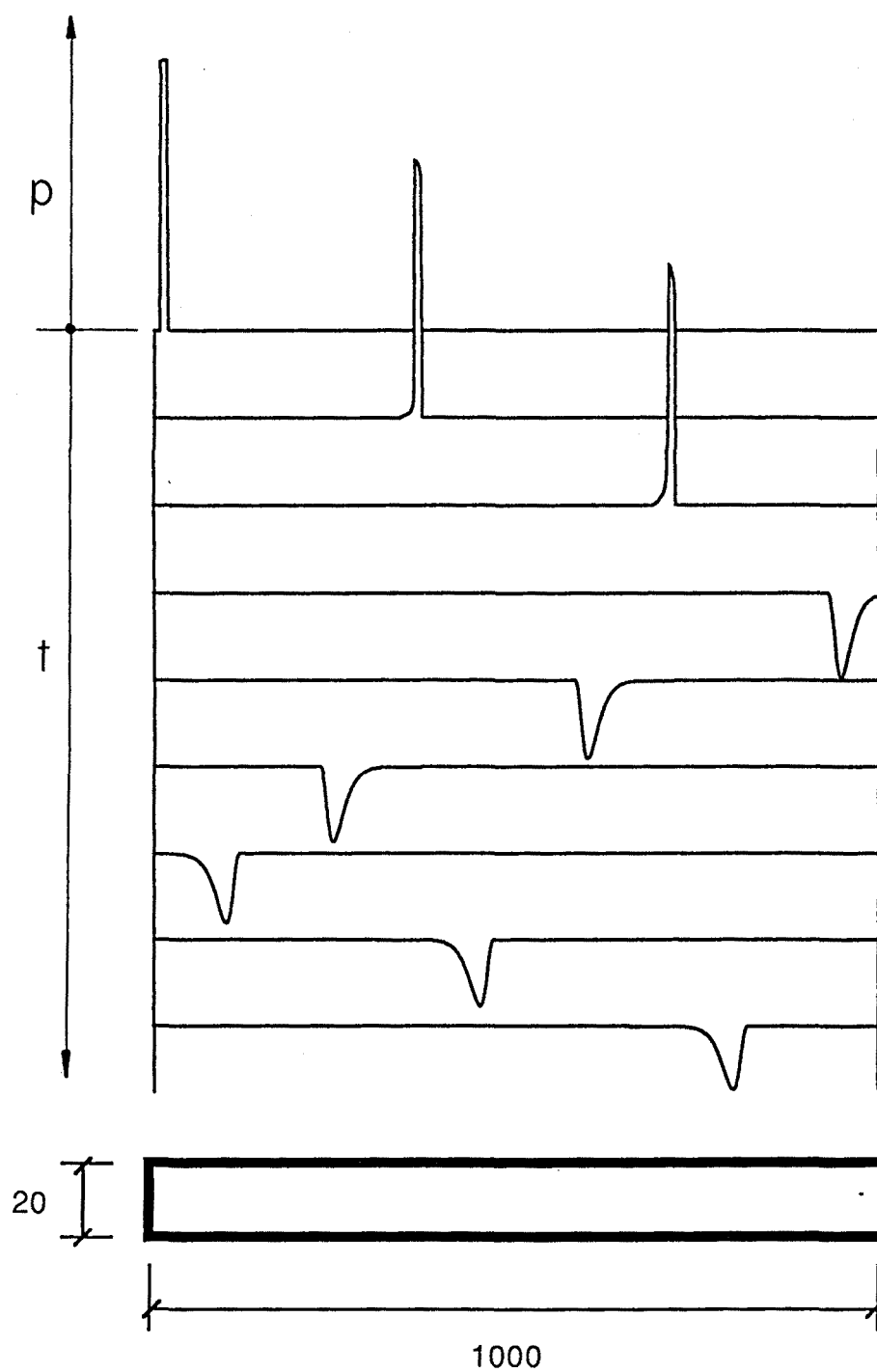


Fig. 4.1-1 Procés de formació de la resposta impulsional en un tub cilíndric tancat-obert.

elèctrica. Tant com sigui cert que la pertorbació produïda sigui un impuls de cabal, serà cert que la fluctuació de pressió que se'n derivi sigui directament la resposta impulsional, i és aquesta senzillesa el que fa especialment atractiva aquesta tècnica.

Si s'accepta que la pertorbació de cabal produïda no és un impuls, cal recorre a tècniques experimentals indirectes. A partir de la detecció de les dues pertorbacions, la de cabal i la de pressió, es determina la resposta freqüencial a través del càlcul de les densitats espectrals de potència. Una vegada coneguda la resposta freqüencial es passa a obtenir la resposta impulsional per mitjà de la TF^{-1} . Aquest procediment, en principi més precis que el basat en l'impuls de cabal en no considerar una aproximació de l'excitació, presenta com a inconvenient els errors numèrics derivats de les múltiples transformacions i manipulacions algebàiques a que cal sotmetre els senyals. Per aquesta raó s'ha preferit emprar el mètode basat en l'impuls de cabal, i per obtenir-lo s'ha escollit la tècnica de la descàrrega elèctrica perquè era la més fàcilment implementable amb els recursos disponibles al laboratori, sense que això excloguís que més endavant s'implementi la tècnica basada en un excitador piezoelèctric.

La fluctuació de pressió a la secció d'entrada es capta per mitjà d'un micròfon capacitiu de 1/4 de polçada -model B&K 4136 n/s 890982- el qual va col·locat en un capçal que al mateix temps suporta els dos electrodos i el tudell de l'instrument. Aquest capçal s'esquematitza a la figura 4.2-1. El micròfon es situa en posició axial, posició que és la més adequada per a captar la pressió corresponent als modes longitudinals de la columna d'aire, al mateix temps que introdueix la condició d'extrem tancat implicada per la resposta impulsional. A la figura 4.2-2 s'observa amb detall el capçal i la disposició del micròfon.

La cavitat interior del capçal, necessària per separar el micròfon dels electrodos i evitar així la possible descàrrega sobre el primer, és cilíndrica de 10 mm de longitud i de 4 mm de diàmetre, de manera que s'adapta al diàmetre d'entrada dels tudells emprats en el tible i la tenora. L'efecte d'aquesta cavitat sobre la resposta impulsional és el d'allargar lleugerament el temps que separa les arribades de les successives reflexions a la secció del micròfon, i modificar per tant les freqüències de ressonància de l'instrument. Malgrat tot

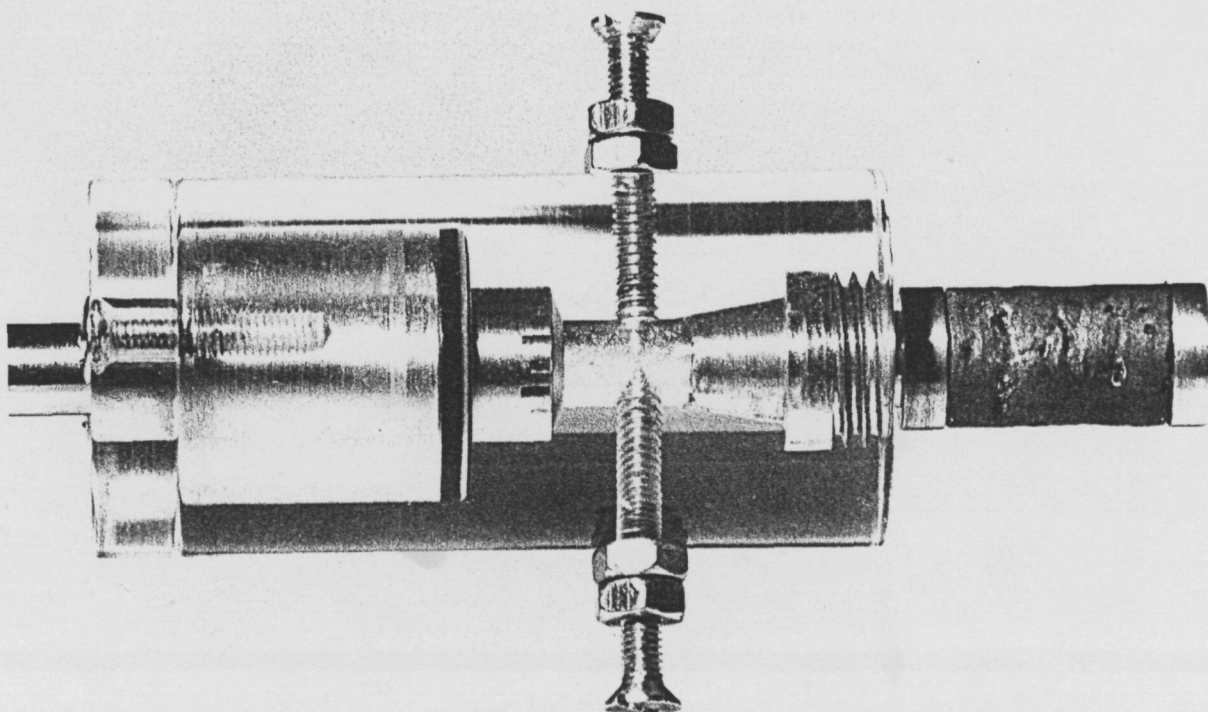


Fig. 4.2-1 Capçal emprat en la determinació experimental de la resposta impulsional.

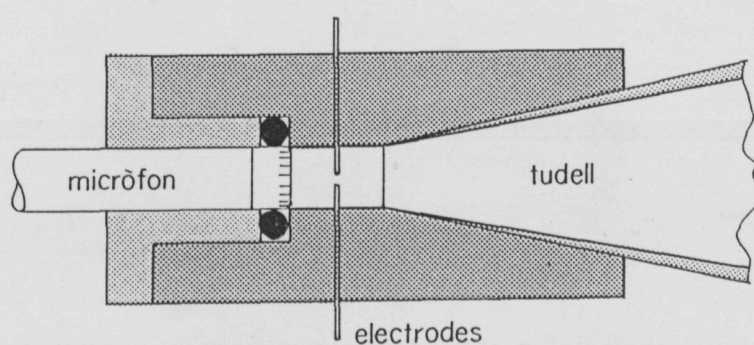


Fig. 4.2-2 Esquema del capçal i disposició dels electrodes i del micròfon.

aquest efecte només és apreciable per a freqüències superiors a 2 kHz i per tant per sobre de la freqüència de tall del tible i la tenora -de l'ordre de 1,2 kHz-.

Per a generar la descàrrega elèctrica s'ha dissenyat i construït un circuit de descàrrega capacitiva. La descàrrega es produeix per mitjà d'un condensador que actua sobre el primari d'una bobina, el secundari de la qual es connecta als electrodos del capçal. La descàrrega es pot controlar manualment o bé automàticament mitjançant un temporitzador -format per un triac i un circuit RC- que permet regular la periodicitat amb que es produeixen les descàrregues. La durada de l'impuls de cabal que s'obté per mitjà de la descàrrega varia entre 90 i 120 μ s, i el seu espectre, representat a la figura 4.2-3, és pràcticament pla fins als 6 kHz -disminueix 3 dB entre zero i 6 kHz-.

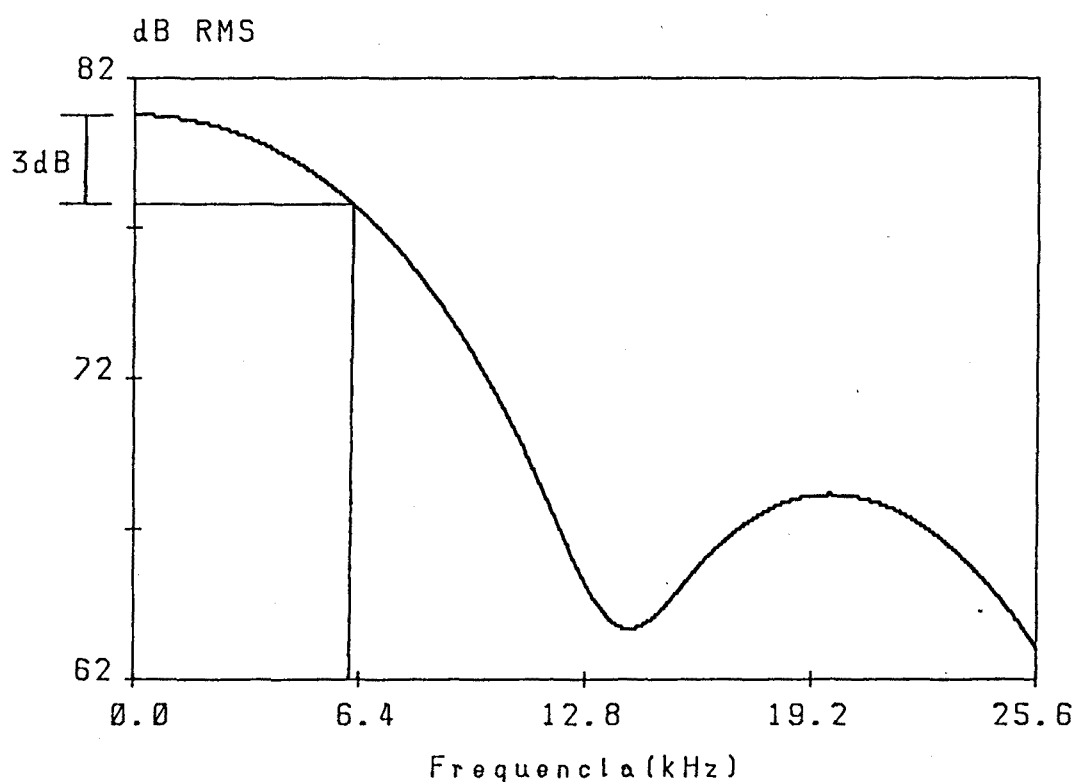


Fig.4.2-3 Espectre de l'impuls de cabal obtingut mitjançant la descàrrega elèctrica.

La resta del muntatge experimental, representat a la figura 4.2-4, és anàleg a l'emprat en la captació dels atacs. El senyal captat pel micròfon s'amplifica amb l'aplicador de mesura i es digitalitza amb l'analitzador a una freqüència de mostreig de 65,5 kHz. S'aconsegueix d'aquesta manera una resolució temporal de $15,3' \mu s$ i un registre de 4096 punts i de 62,5 ms de durada, suficient per enregistrar la resposta fins que s'esmoreeix totalment. Per últim el senyal digitalitzat és tramès al microordinador que realitza les tasques de calibració i de representació gràfica.

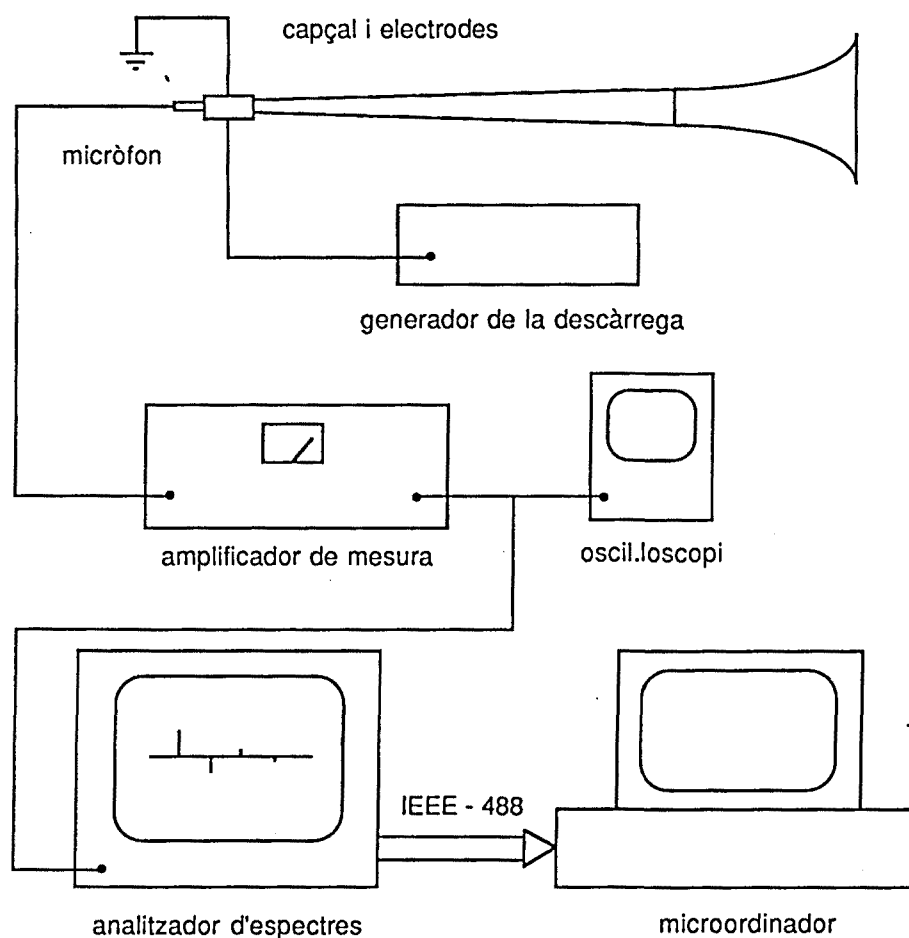


Fig. 4.2-4 Muntatge experimental per a la mesura de la resposta impulsional.